

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
ГОУ ВПО "Дальневосточный государственный
университет путей сообщения"

Кафедра "Электротехника, электроника, электромеханика"

В. И. Сечин, О. В. Моисеева

ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ

Рекомендовано Дальневосточным региональным учебно-методическим центром
(ДВ РУМЦ) в качестве учебного пособия для студентов вузов региона специальностей
190401 "Электроснабжение железных дорог", 190301 "Локомотивы",
190303 "Электрический транспорт железных дорог",
190205 "Подъемно-транспортные, дорожные и строительные машины и
оборудование"

Хабаровск
Издательство ДВГУПС
2008

УДК 621.313.045 (075.8)
ББК 3 261 – 044я73

Рецензенты:

Кафедра "Электротехника и электроника"
Тихоокеанского государственного университета
и. о. заведующего кафедрой кандидат технических наук, доцент В. В. Корчевский.

Кандидат технических наук, доцент Хабаровского института инфокоммуникации
филиала Сибирского государственного университета телекоммуникации и
информатики А. Н. Семешко.

Сечин В. И., Моисеева О. В. Обмотки электрических машин и трансформаторов: учеб.
пособие, Хабаровск. Издательство ДВГУПС, 2008.

Учебное пособие соответствует ГОС ВПО направления подготовки дипломированных специалистов 190400 "Системы обеспечения движения поездов" всех специальностей. Представлены общие сведения об обмотках электрических машин постоянного и переменного тока, а также силовых трансформаторов. Рассмотрены методики расчетов обмоток различных типов, правила построения развернутых схем, векторных диаграмм. Приведены примеры расчетов и выполнения обмоток якоря машин постоянного тока различных типов, особенности расчета и выполнения схемы обмоток статора машин переменного тока, а также методики расчета различных обмоток силовых трансформаторов. Дополнительно приводятся наиболее распространенные схемы обмоток статора многоскоростных асинхронных двигателей с переключением числа полюсов. Предназначено для студентов 3-го курса всех форм обучения, изучающих дисциплину "Электрические машины и привод".

УДК 621.313.045 (075.8)
ББК 3 261 – 044 я 73

Введение

Обмотка якоря является самым важным элементом машин постоянного тока, а обмотка статора – машин переменного тока как синхронных, так и асинхронных. В трансформаторах наиболее ответственными частями конструкции также являются обмотки высокого и низкого напряжения.

К сожалению, при чтении курсов "Электромеханика" и "Электрические машины и привод" сложно подробно представить информацию по обмоткам электрических машин и трансформаторов, так как для этого требуется много времени.

В новых учебниках по электрическим машинам, выпущенных в последние годы, не достаточно подробно представлены материалы по обмоткам различных типов электрических машин, особенно методики их расчета, выполнение развернутых схем, схем параллельных ветвей, звезд пазовых $\mathcal{E}_{дс}$, $\mathcal{E}_{дс}$ секций и векторных диаграмм обмоток.

Для помощи студентам при изучении разделов обмоток в курсе электрических машин подготовлено настоящее учебное пособие. Оно будет полезно при выполнении домашних заданий по обмоткам якоря машин постоянного тока, обмоткам статора машин переменного тока. Также это пособие позволит повысить качество курсового проектирования по расчету машин постоянного тока, синхронных и асинхронных машин и силовых трансформаторов.

Учебное пособие состоит из четырех разделов. В первом разделе подробно представлены методики расчета разных типов обмоток якоря машин постоянного тока с примерами расчета, построения развернутых схем обмоток, схем параллельных ветвей, звезд пазовых $\mathcal{E}_{дс}$ и $\mathcal{E}_{дс}$ секций, а также векторной диаграммы обмотки.

Второй раздел посвящен обмоткам переменного тока. Достаточно четко представлены методики расчета и построения схем двухслойных и однослойных обмоток различных типов. Причем представлены примеры выполнения различных обмоток.

В третьем разделе описаны особенности выполнения схем обмоток многоскоростных синхронных двигателей как двухскоростных, так и трехскоростных и четырехскоростных.

Четвертый раздел пособия посвящен обмоткам современных силовых трансформаторов. Достаточно подробно описаны конструктивные особенности обмоток различных типов. Рассмотрены критерии выбора обмоток для различных трансформаторов в зависимости от мощности и класса напряжений. Приводится методика расчета обмоток различных типов.

Надеемся, что учебное пособие "Обмотки электрических машин и трансформаторов" будет полезно студентам при изучении курсов "Электромеханика" и "Электрические машины и привод".

1. Якорные обмотки электрических машин постоянного тока.

1.1 .Общие сведения о якорных обмотках. Устройство обмоток.

Обмотка якоря электрической машины постоянного тока является важнейшим элементом машины, и она в основном определяет надежность и срок ее службы. Место обмотки якоря в конструкции машин постоянного тока наглядно поясняет рис. 1. 1. В связи с этим конструированию, расчету и технологии изготовления обмоток предъявляются важные требования. Они в основном сводятся к следующим условиям:

- обмотка должна быть рассчитана на задание величины напряжения и тока нагрузки, соответствующие номинальной мощности;
- обмотка должна иметь необходимую электрическую, механическую и термическую прочность, обеспечивающую срок службы в течение 15 – 20 лет;
- конструкция обмотки должна обеспечивать удовлетворительные условия токоотвода с коллектора без вредного искрения;

– расход материалов на изготовление обмоток при заданных эксплуатационных требованиях должен быть минимальным;

– технология изготовления должна быть по возможности простой.

Обмотка якоря выполняется в пазах сердечника якоря, набранного из штампованных листов электротехнической стали.

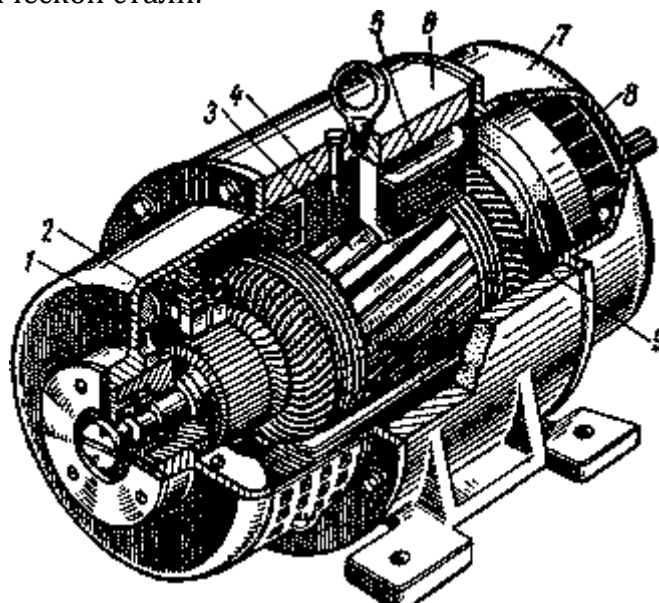


Рис. 1. 1. Устройство электрической машины постоянного тока:
1 – коллектор; 2 – щетки; 3 – сердечник якоря; 4 – главный полюс;
5 – катушка обмотки возбуждения; 6 – корпус; 7 – подшипниковый щит;
8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря.

Конструкция сердечника якоря и технология его сборки показана на рис. 1. 2.

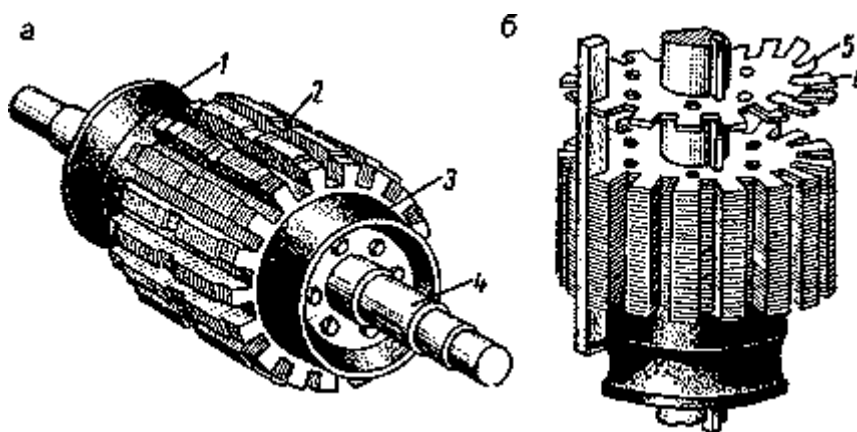


Рис. 1. 2. Сердечник якоря (а) и процесс его сборки (б):
1 и 3 – нажимные шайбы (обмоткодержатели); 2 – выточки для наложения бандаж;
4 – место для запрессовки коллектора; 5 – изоляционная пленка; 6 – стальной лист.

В настоящее время практически во всех электрических машинах постоянного тока обмотки якоря выполняются в пазах на внешней поверхности якоря, такие обмотки называются барабанными. В основном они выполняются двухслойными. Однослойные обмотки применяются только в машинах малой мощности.

Порядок укладки секций обмотки барабанного якоря и расположение обмотки в пазах сердечника якоря поясняет рис. 1. 3.

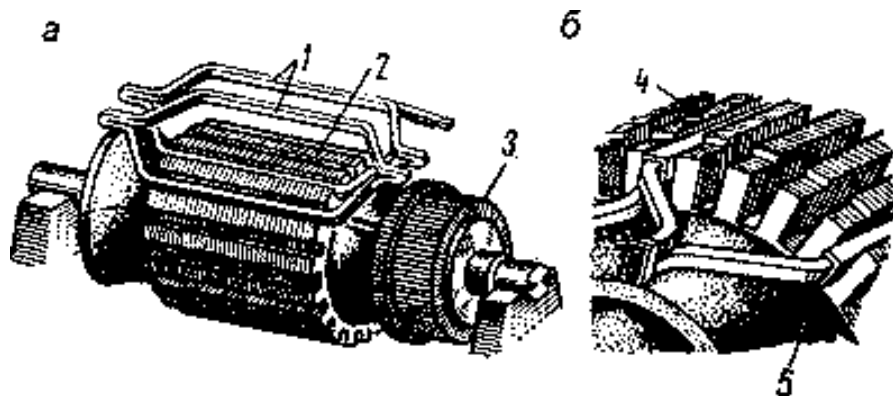


Рис. 1. 3. Наложение обмотки на сердечник якоря (а) и расположение якорных катушек в пазах (б): 1 – якорные катушки; 2 – сердечник якоря; 3 – коллектор; 4 – верхняя сторона якорной катушки; 5 – нижняя сторона.

По конструкции обмотки подразделяются на петлевые и волновые. Такое название они получили за конфигурацию основных элементов, из которых состоят обмотки, которыми являются секции. Вторым основным элементом обмотки якоря является коллектор, который состоит из отдельных медных коллекторных пластин, изолированных друг от друга и вала. Коллектор обычно имеет цилиндрическую конструкцию с рабочей поверхностью на внешней стороне. На коллектор опираются щетки, установленные в щеткодержателях, закрепленных на подшипниковых щитах машины. Щетки прижимаются к коллектору пружинами. Количество щеток в машине всегда принимается равным числу полюсов. Конструкция коллектора показана на рис. 1. 4, а конструкция щеткодержателей со щетками – на рис. 1. 5.

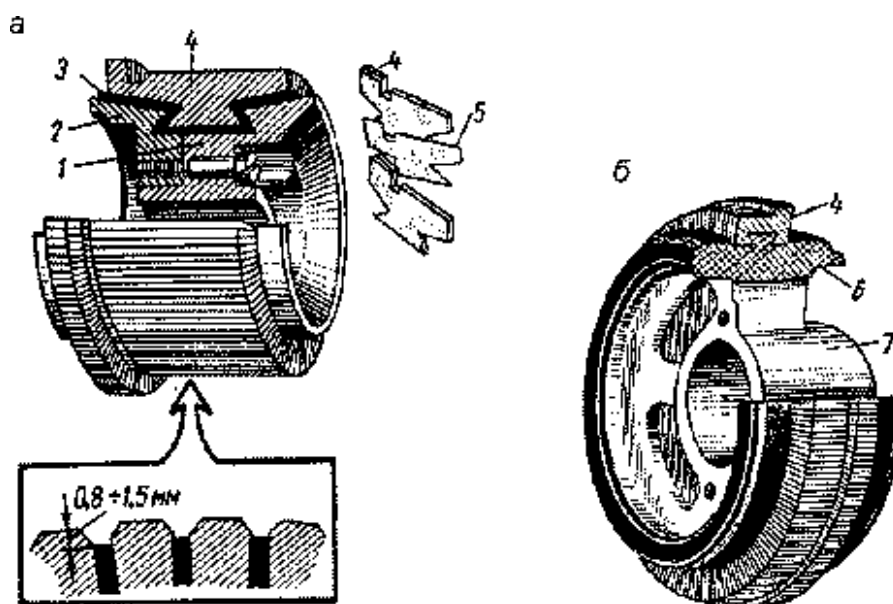


Рис. 1. 4. Коллектор машины постоянного тока с металлическим (а) и пластмассовым (б) корпусом: 1 – корпус; 2 – нажимной фланец; 3 – изоляционные манжеты; 4 – коллекторные пластины; 5 – изоляционные прокладки; 6 – пластмасса; 7 – втулка.

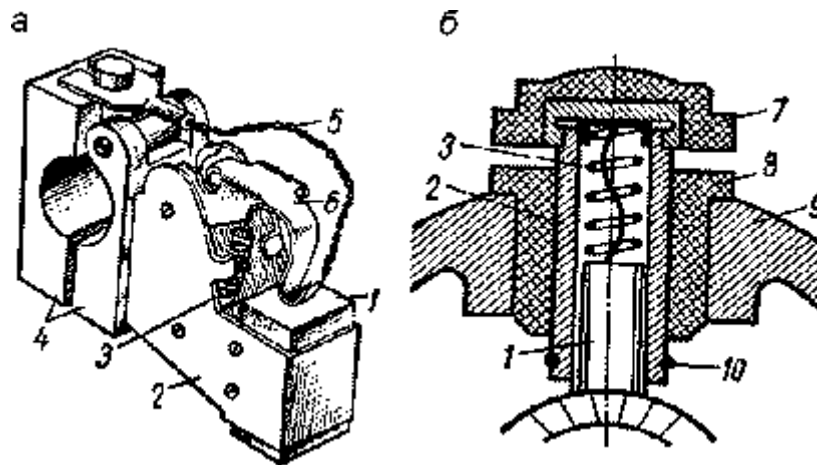


Рис. 1. 5. Щеткодержатели машин средней (а) и малой (б) мощности:
1 – щетка; 2 – обойма; 3 – пружина; 4 – зажимы для крепления к щеточному пальцу;
5 – щеточный канатик; 6 – нажимной палец; 7 – колпак; 8 – изоляционная втулка;
9 – подшипниковый щит; 10 – зажим для выводного проводника.

Отдельные секции обмотки припаиваются или привариваются специальной сваркой в среде инертного газа к коллекторным пластинам. Примеры секции петлевой и волновой обмоток якоря с подключенными к их концам коллекторными пластинами показаны соответственно на рис. 1. 6 и рис. 1. 7.

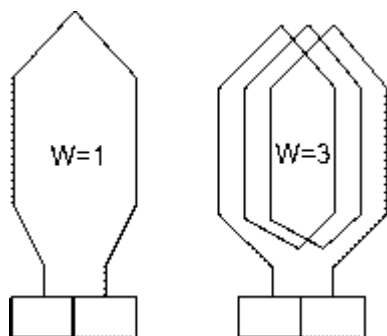


Рис. 1. 6. Одновитковая и трехвитковая секции петлевой обмотки.

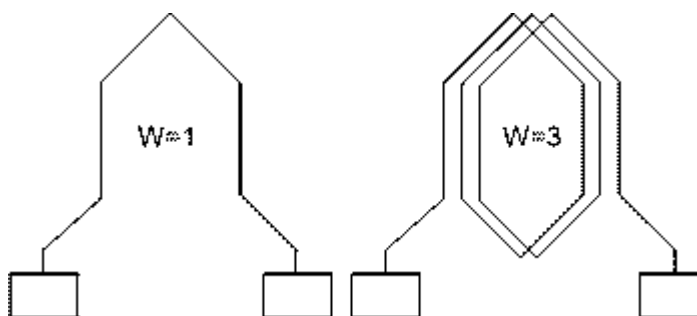


Рис. 1. 7. Одновитковая и трехвитковая секции волновой обмотки.

Отдельные секции обмотки соединяются друг с другом последовательно в общую цепь, причем так, что конец первой секции присоединяется к началу второй секции, конец второй секции – к началу третьей и т. д. А конец последней секции обмотки якоря присоединяется к началу первой. Таким образом, обмотка оказывается замкнутой в общую схему. Примеры соединения секции в схему обмотки показаны на рис. 1. 8 соответственно для петлевой и волновой обмоток.

Количество секций, входящих в схему обмотки якоря обычно велико. Чем больше секций в обмотке, тем меньше пульсация напряжения якоря. В связи с этим велико и число пазов для укладки секций и пазы получают с узкими зубцами. Зубцы получают некрепкими и зубцовый слой может разрушиться при вращении якоря. Поэтому в реальных машинах пазы якоря делают относительно крупными с большими зубцами, а в паз якоря укладывают не одну секцию обмотки, а несколько. В связи с этим вводится понятие реальных и элементарных пазов якоря.

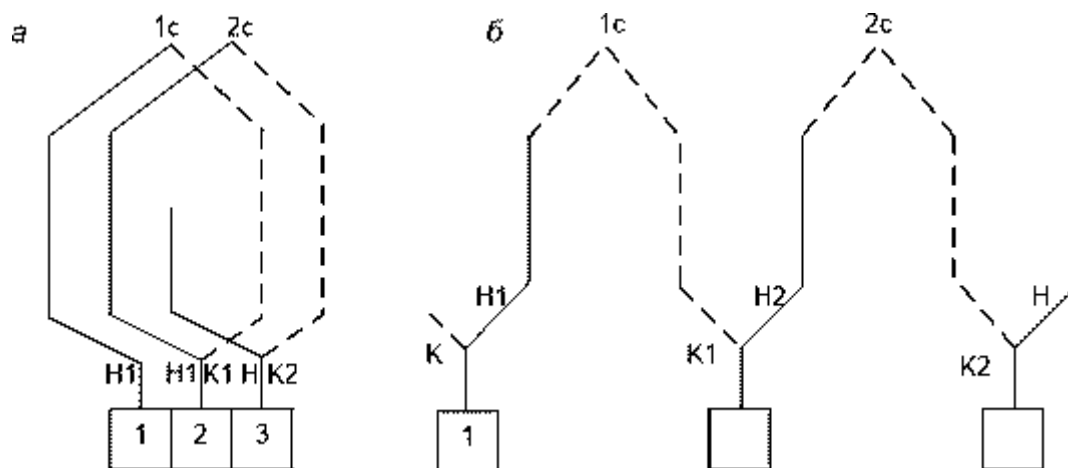


Рис. 1. 8. Соединение секций петлевой (а) и волновой (б) обмоток.

Каждая секция состоит из двух активных сторон – это часть секции, находящаяся в пазах якоря, и лобовой части, которые объединяют активные стороны секции (рис. 1. 9, 1. 10).

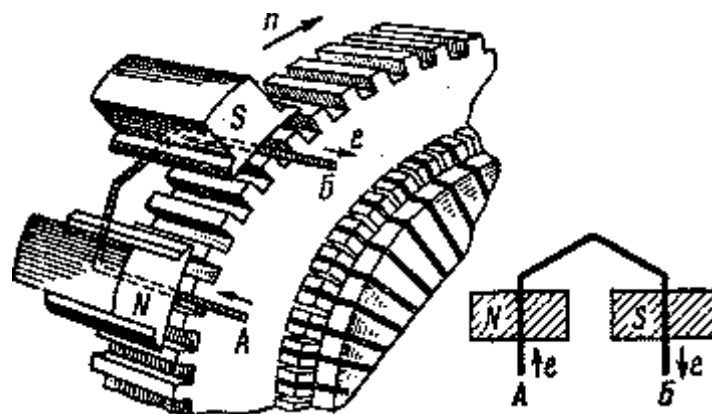


Рис. 1. 9. Расположение проводников обмотки на барабанном якоре.

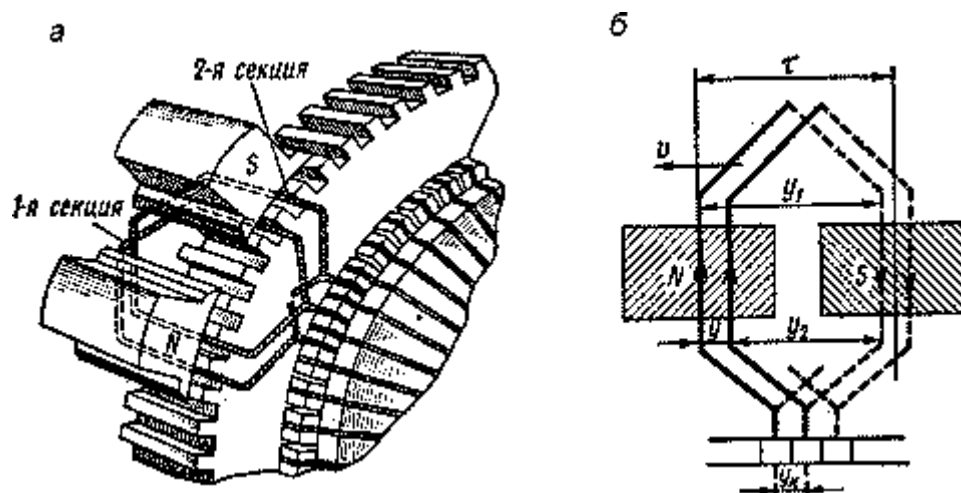


Рис. 1. 10. Общий вид петлевой обмотки (а) и схема соединений ее секций (б).

На этих рисунках показано расположение проводников обмотки на барабанном якоре (рис. 1. 9) и общий вид петлевой обмотки (рис. 1. 10). Общий вид волновой обмотки в пазах барабанного якоря поясняет рис. 1. 11.

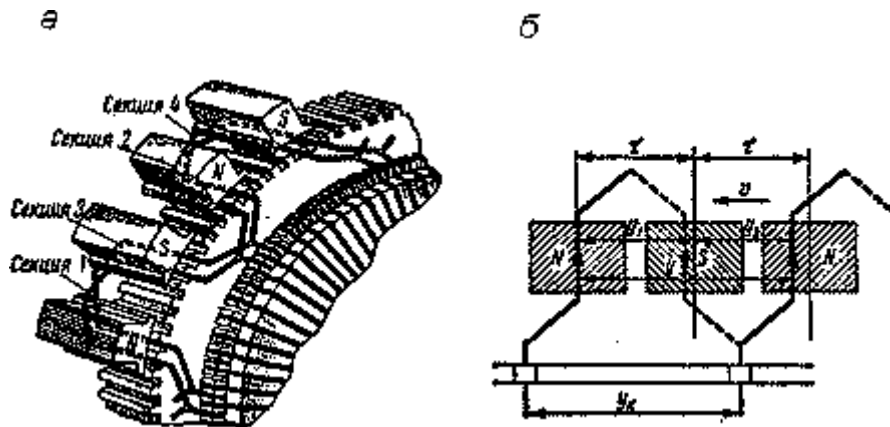


Рис. 1. 11. Общий вид волновой обмотки (а) и схема соединения ее секций (б).

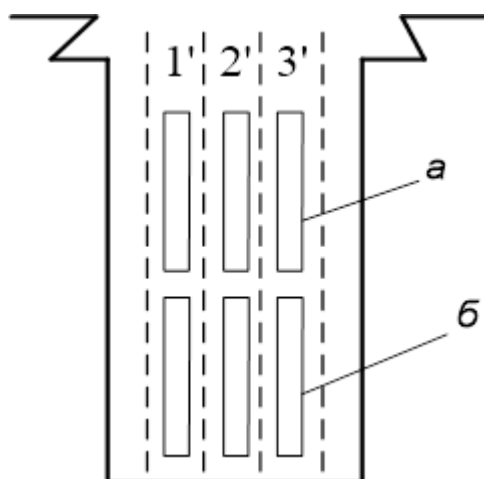


Рис. 1. 12. Укладка обмотки в реальном пазу: 1 – реальный паз; 1' – первый элементарный паз; 2' – второй элементарный паз; 3' – третий элементарный паз; а – сторона секции верхнего слоя; б – сторона секции нижнего слоя

На рис. 1. 12 показан реальный паз, в который входит три элементарных пазов для укладки двухслойной обмотки якоря. Число элементарных пазов в реальном обозначается U_z и для приведенного примера $U_z = 3$ (рис. 1. 12). В реальных машинах U_z колеблется от 1 до 8.

На схемах двухслойных обмоток активная сторона секции верхнего слоя пазов обозначается сплошной линией, а нижнего слоя – прерывистой линией (рис. 1. 13).

Если, $U_z > 1$ то при укладке секций в реальные пазы возможны два варианта. Первый, когда все секции имеют одинаковую ширину (рис. 1. 13), такие обмотки называются равносечными. Во втором варианте секции имеют разную ширину (рис. 1. 14), и такие обмотки называются ступенчатыми. На практике предпочтение отдается равносечным обмоткам, хотя это не всегда возможно особенно при перемотке якоря на другое напряжение.

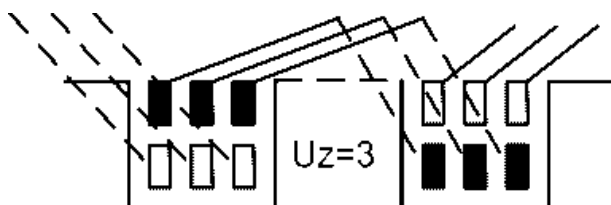


Рис. 1. 13. Укладка секций двухслойной обмотки в реальные пазы, число элементарных пазов в реальном $U_z = 3$.

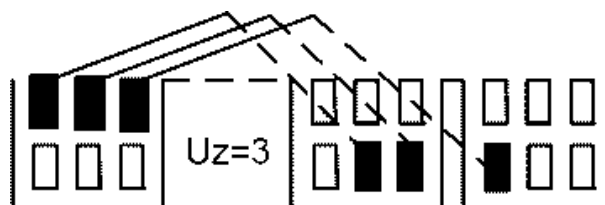


Рис. 1. 14. Пример ступенчатой обмотки с $U_z = 3$. Ширина первых двух секций одинакова, а третьей секции – больше.

Число секций, из которых состоит обмотка якоря, обозначается буквой S .

Число реальных пазов на поверхности якоря обозначается буквой Z , тогда число элементарных пазов якоря – $Z_3 = Z \times U_z$.

Число коллекторных пластин коллектора обозначается буквой K .

Обмотка выполняется только при условии $S = Z_3 = K$.

Во избежание большого напряжения между соседними коллекторными пластинами коллектора число их должно быть достаточно большим. Для машин с напряжением 110 – 220 В, $K/2p = 12 - 35$. В приведенном выражении $2p$ – число полюсов машины, p – число пар полюсов. В равносекционных обмотках секции, которые лежат рядом в общих пазах, объединяются в катушку и имеют общую изоляцию от стенок паза. Формы якорных секций соответственно для петлевой и волновой обмоток на рис. 1.15.

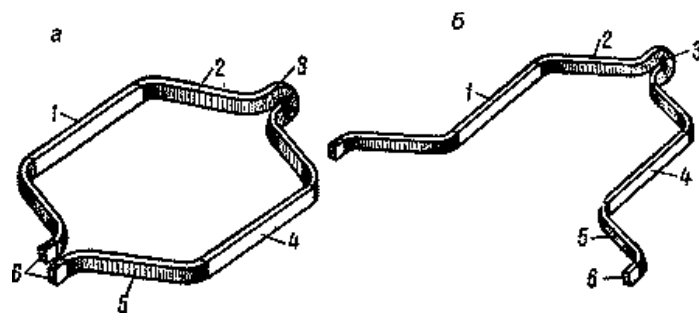


Рис. 1.15. Формы якорных катушек при петлевой (а) и волновой (б) обмотках (при одновитковых секциях): 1 и 4 – пазовые части; 2 и 5 – лобовые части; 3 – задняя головка; 6 – концы секций, припаиваемые к коллектору.

Одновитковые секции при больших токах изготавливаются из стержней, которые на стороне противоположной коллектору спаиваются или свариваются. Секции ступенчатой обмотки всегда выполняются стержневыми. Примеры стержней для петлевой и волновой обмоток якоря на рис. 1.16.

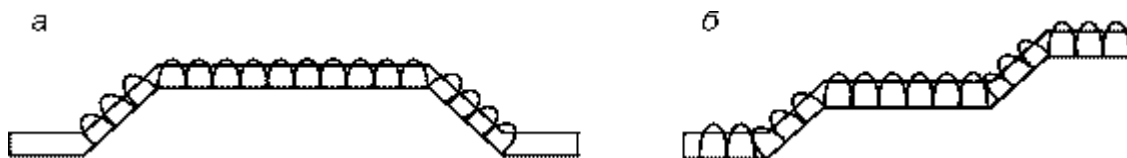


Рис. 1.16. Полукатушки (стержни) петлевой (а) и волновой (б) обмоток.

В электрических машинах малой мощности, когда ток параллельной ветви обмотки якоря не превышает 50–75 А, катушки изготавливаются из круглых изолированных проводников. В этом случае пазы выполняются трапецевидными, чтобы зубцы были с параллельными стенками. Это позволяет избежать насыщения зубцов. Если обмотка выполняется из прямоугольного провода, то пазы – полузакрытыми или открытыми (рис. 1.17).

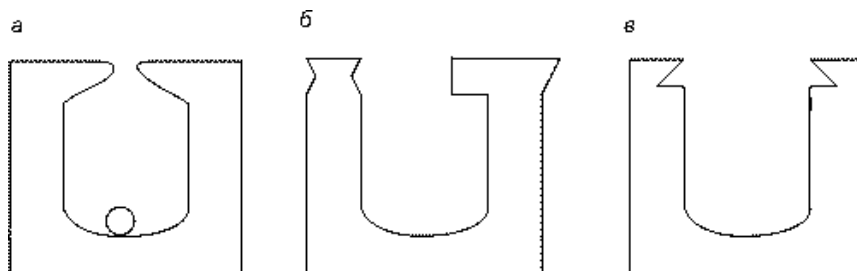


Рис. 1.17. Форма пазов якоря для укладки обмотки: а – закрытый; б – полузакрытый; в – открытый.

Компоновка пазов различной формы для изоляции класса А при изготовлении обмотки из круглого и прямоугольного провода показана на рис. 1. 18. Компоновка паза соответствует двухслойной барабанной обмотки.

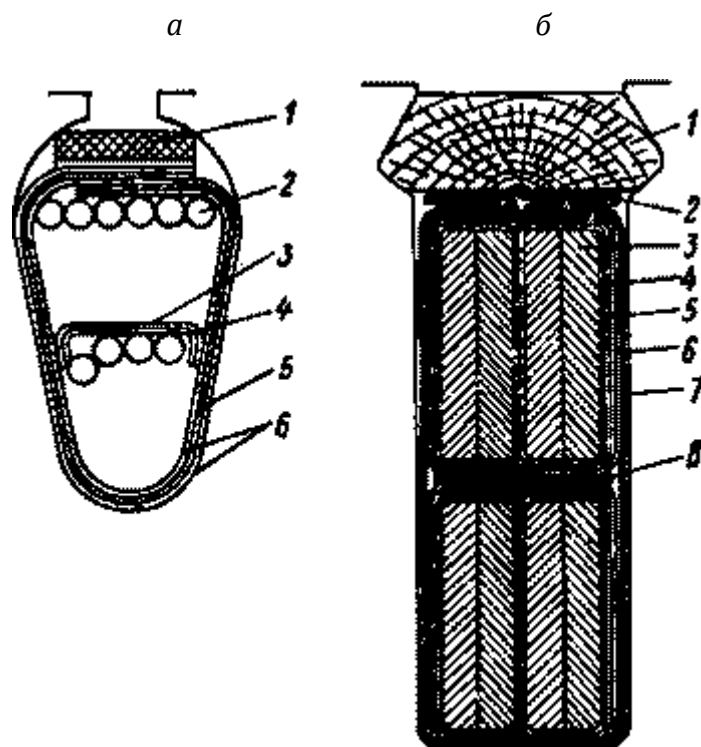


Рис. 1. 18. Пазовая изоляция класса А: а – полузакрытый паз: 1 – клин гетинаксовый; 2 – изолированные проводники; 3 – прокладки из стеклолакоткани 0,18 мм.; 4 – прокладка из электрокартона 0,2 мм.; 5 – стеклолакоткань эскапоновая 0,18 мм.; 6 – электрокартон 0,2 мм.; б – открытый паз: 1 – клин деревянный; 2 – прокладка из электрокартона; 3 – изолированный проводник; 4 – микалента или синтетическая лента 0,13 мм.; 5 – микалофий или синтетическая пленка; 6 – телефонная бумага; 7 – электрокартон 0,2 мм.; 8 – прокладка из электрокартона.

Если диаметр якоря $D_a < 0,40$ м., а линейная скорость на поверхности якоря < 35 м/с, то обмотка в пазах укрепляется с помощью проволочных бандажей. Во всех других случаях обмотка в пазах крепится с помощью клиньев, выполненных из твердых пород дерева (бук, дуб и др.), гетинакса, текстолита, стеклотекстолита, немагнитной стали. Плотность тока в обмотках якоря обычно зависит от интенсивности охлаждения и берется в пределах от 4 до 10 А/мм². Меньшая цифра принимается в больших машинах, а большая – в малых.

1. 2. Условия симметрии обмоток.

В якорных обмотках отдельные секции соединяются последовательно друг с другом и образуют замкнутую на себе цепь (рис. 1. 19).

Согласно рис. 1. 19 обмотка якоря делится щетками, установленными на коллекторе на параллельные ветви. Число параллельных ветвей, обычно обозначается a . Ток якоря обозначают I_a , а ток отдельной параллельной ветви – ia .

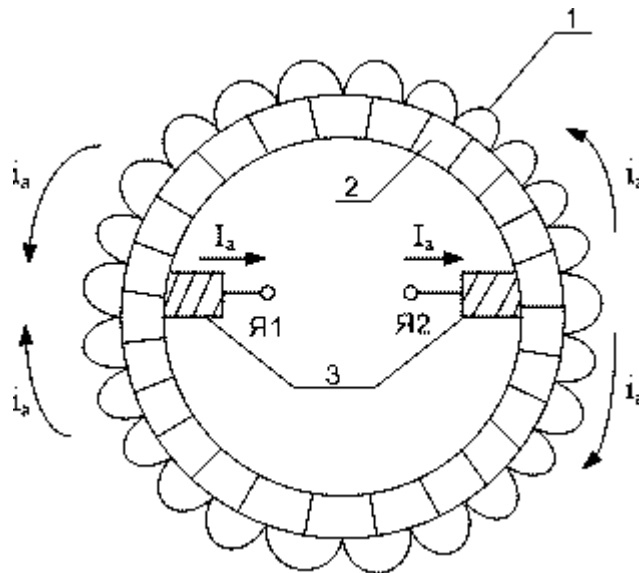


Рис. 1. 19. Принципиальная схема простой петлевой обмотки якоря:
1 – секции обмотки; 2 – коллектор; 3 – щетки.

Тогда ток отдельной параллельной ветви определится:

$$i_a = \frac{I_a}{a}$$

Для того чтобы токи во всех параллельных ветвях были равны, требуется выполнение следующих условий:

- эдс отдельных параллельных ветвей должна быть одинаковой;
- сопротивление отдельных параллельных ветвей должно быть равным.

Для выполнения этих условий необходимо, во-первых, чтобы магнитная цепь была симметрична по устройству и магнитные потоки всех полюсов были равны, во-вторых, чтобы все пары параллельных ветвей были эквивалентны, т. е. они располагались в магнитном поле идентичным образом. Обмотка удовлетворяющая этим требованиям называется симметричной. Если названные условия не выполняются, разные ветви обмотки якоря будут нагружаться различными токами, что вызывает нарушение работы щеточных контактов (щетка-коллектор), а также приводит к увеличению потерь в обмотках и снижению *кпд* машины.

Для того чтобы обмотка была симметричной, необходимо:

- число секции на каждую пару параллельных ветвей было одинаковым и равным целому числу;
- число коллекторных пластин на каждую пару параллельных ветвей также было одинаковым и равным целому числу. Таким образом, условие симметрии обмоток можно записать так:

$$\frac{S}{a} = \frac{K}{a} = \frac{Z_{\Sigma}}{a} = \text{целое число}$$

Для симметричного расположения параллельных ветвей в магнитном поле машины необходимо:

$$\frac{Z}{a} = \text{целое число}; \frac{2p}{a} = \text{целое число}$$

где Z – число реальных пазов; $2p$ – число полюсов машины, a – количество параллельных ветвей.

1. 3. Шаги обмоток якоря.

При выполнении развернутых схем обмотки якоря следует рассчитать шаги обмоток. В машинах постоянного тока обмотка якоря имеет четыре шага.

Первый частичный шаг обмотки по якорю – y_1 – это расстояние между первой и второй активными сторонами одной секции, т. е. это ширина секции. Этот шаг измеряется линейными размерами или числом элементарных (реальных) пазов.

Этот шаг для любой обмотки определяется следующим образом:

$$y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} \pm \varepsilon = \text{целое число в элементарных пазах}$$

$$y_1 = \frac{\pi \times Da}{2p} \pm \varepsilon - \text{в линейных размерах}$$

где $Z_{\text{э}}$ – число элементарных пазов; $2p$ – число полюсов; Da – внешний диаметр якоря; ε – дробь, которую следует прибавить или отнять, чтобы y_1 был целым числом. В этих выражениях:

$$\frac{Z_{\text{э}}}{2p} = \tau \quad \frac{\pi \times Da}{2p} = \tau$$

где τ – называется полюсным делением якоря, т. е. это часть окружности якоря приходящаяся на один полюс. Таким образом первый частичный шаг обмотки $y_1 \approx \tau$. Так, если $y_1 \approx \tau$, то обмотка называется обмоткой с полным шагом. Это идеальный случай и эдс секции является максимальной.

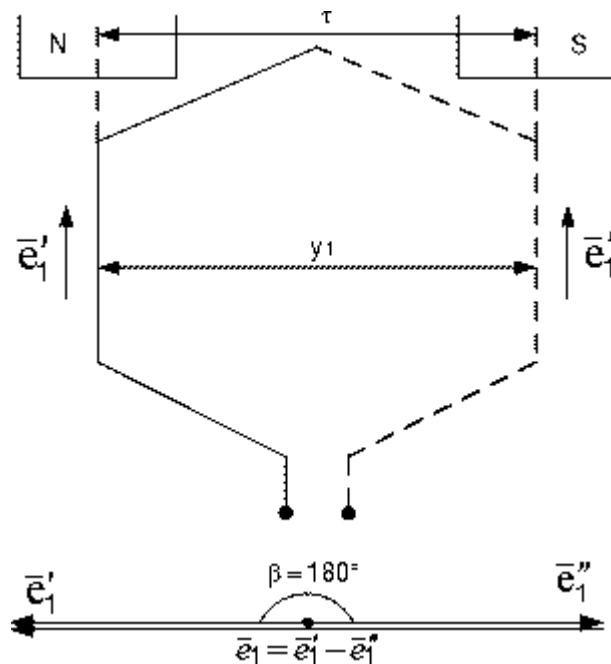


Рис. 1. 20. Электродвижущая сила секции при условии $y_1 = \tau$.

На рис. 1. 20 поясняется определение e_1 секции при выполнении условия, что $y_1 \approx \tau$ (обмотка с полным шагом), но на практике не всегда возможно выполнение обмотки с полным шагом, особенно при перемотке якоря на новые параметры напряжения и тока. Если шаг обмотки меньше полюсного деления $y_1 < \tau$ – обмотка называется обмоткой с укороченным шагом. В этом случае эдс секции e_1 меньше, чем при полном шаге (рис. 1. 21).

При условии $y_1 > \tau$ – обмотка называется с удлинненным шагом и эдс секции e_1 также будет меньше эдс обмотки с полным шагом (рис. 1. 22). Удлинение и укорочение шага обмотки y_1 на одну и ту же величину равнозначно в электромагнитном отношении. Поэтому на практике чаще применяют укорочение шага y_1 , что позволяет экономить медь (обмоточный провод) на выполнение лобовых частей обмотки. Второй частичный шаг обмотки по якорю y_1 – это расстояние между второй активной стороной первой секции и первой активной стороной второй секции, следующей за первой по схеме обмотки.

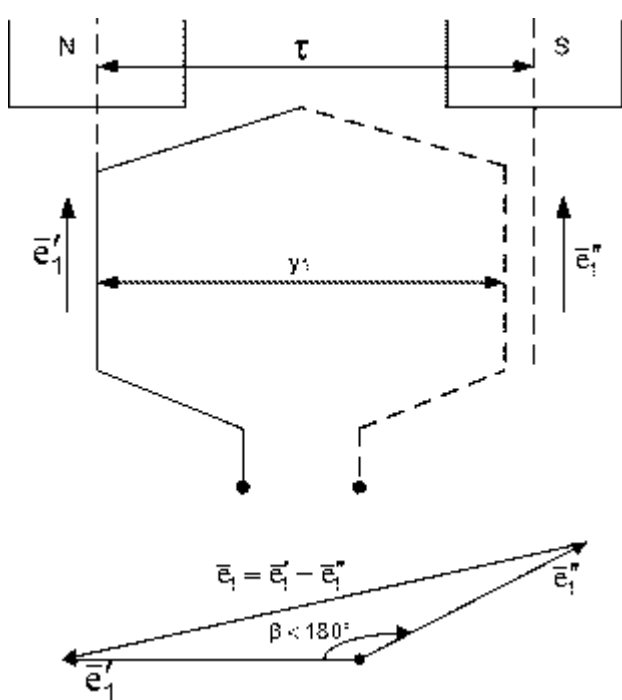


Рис. 1. 21. Электродвижущая сила секции e_1 при условии $y_1 < \tau$.

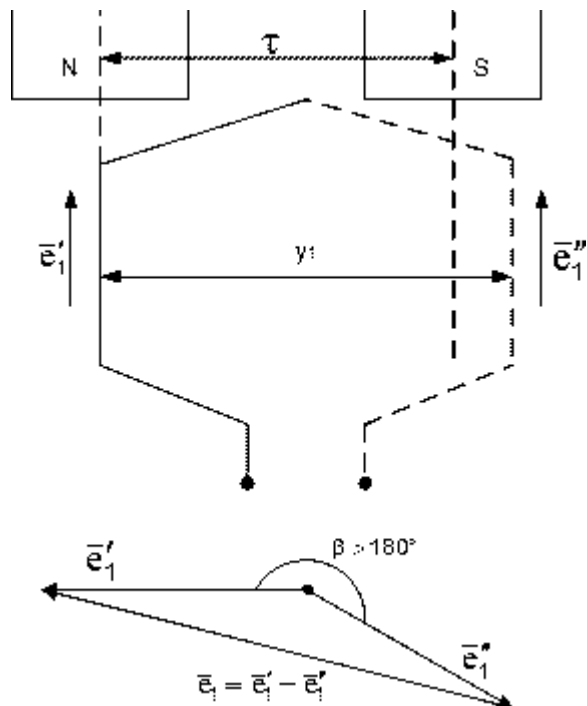


Рис. 1. 22. Электродвижущая сила секции e_1 при условии $y_1 > \tau$.

Результирующий шаг обмотки y – это расстояние между первыми или вторыми сторонами двух секций, следующих друг за другом по схеме обмотки, причем $y = y_1 + y_2$. Шаг обмотки по коллектору y_k – это расстояние между началом и концом одной секции на коллекторе, измеряемое числом коллекторных делений. Коллекторное деление – это ширина пластины, плюс ширина одной изолирующей прокладки между соседними коллекторными пластинами. Шаг по коллектору y_k определяет расстояние между серединами коллекторных пластин в коллекторных делениях. Для всех типов обмоток шаг по коллектору y_k в коллекторных делениях и результирующий шаг обмотки y в элементарных пазов численно равен:

$$y_k = y$$

Шаг y_1 , y_2 , y – удобно рассчитывать и измерять в зубовых делениях или числе элементарных пазов. Так,

$$y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} \pm \varepsilon$$

соответствует числу элементарных пазов (1. 23).

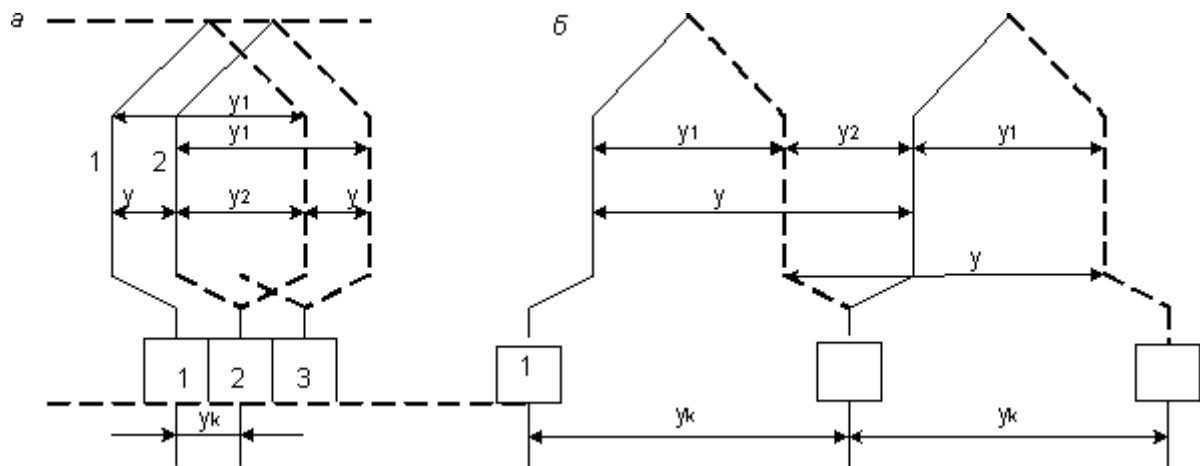


Рис. 1. 23. Шаги обмотки якоря y_1, y_2, y, y_k для петлевой (а) и волновой (б) обмоток

1. 4. Простые петлевые обмотки.

Особенностью простой петлевой обмотки является то, что шаг по коллектору и результирующий шаг по якорю равны единице $y_k = y = \pm 1$.

Если $y_k = y$ принимается равным $+1$, то обмотка получается правоходовая неперекрывающаяся, т. е. намотка обмотки якоря происходит слева направо (рис. 1. 24).

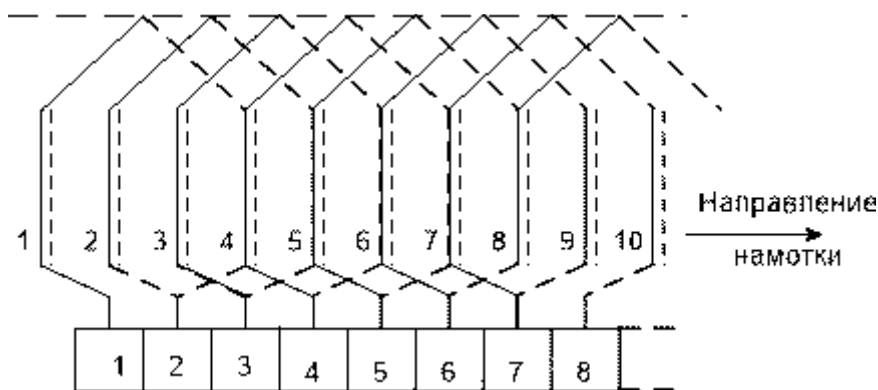


Рис. 1. 24. Пример намотки правоходовой неперекрывающейся простой петлевой обмотки $y_k = y = \pm 1$.

Если $y_k = y$ принимается равным -1 , то обмотка будет левоходовой перекрывающейся (рис. 1. 25). Для расчета обмотки обычно задают следующие данные:

Z – число реальных пазов якоря;

U_z – число элементарных пазов в реальном;

$2p$ – число полюсов машин;

α – коэффициент магнитного перекрытия;

$$\alpha = \frac{bn}{\tau}$$

здесь bn – ширина полюсной дуги, τ – полюсное деление.

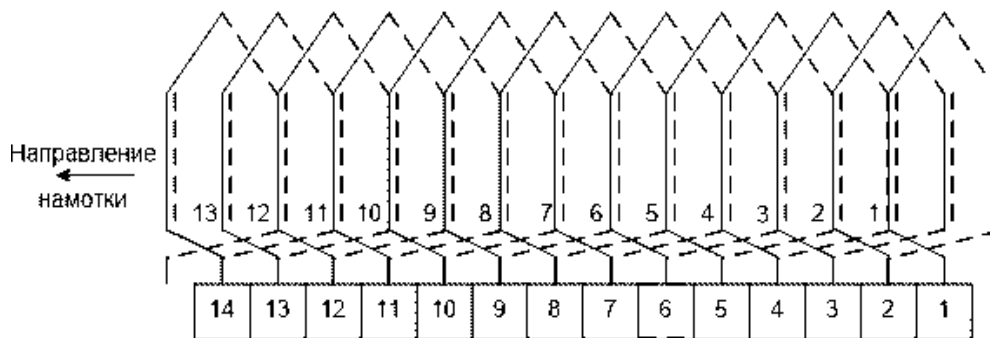


Рис. 1. 25. Пример намотки левоходовой перекрещивающейся простой петлевой обмотки $yk = y = -1$.

Порядок расчета простой петлевой обмотки следующий:

- определяется число элементарных пазов $Z_э = Z \times U_z$;
- определяется число секций S , оно всегда равно числу элементарных пазов $S = Z_э$;
- определяется число коллекторных пластин K , оно принимается равным числу элементарных пазов, $K = Z_э$;
- расчет первого частичного шага обмотки выполняется по выражению:

$$y_1 = \frac{Z_э}{2p} \pm \varepsilon$$

и всегда должно быть равным целому числу.

- результирующий шаг простой петлевой обмотки $y = \pm 1$. Удобнее шаг принимать равным $+1$. При этом обмотка получится правоходовая неперекрещивающаяся;

- рассчитывается второй частичный шаг по уравнению $y_2 = y - y_1$;

Обычно шаг y_2 получается отрицательным. Это указывает, что шаг отсчитывается в обратном шагу y_1 направлении;

- шаг по коллектору принимается равным результирующему шагу обмотки, т. е. $yk = y = \pm 1$.

- ширина полюса bn определяется по уравнению $bn = \alpha \times \tau$. Обычно коэффициент магнитного перекрытия задается в пределах $\alpha = 0,62 - 0,72$. Ширина полюса bn необходима для расстановки полюсов на схеме обмотки якоря;

- определяется угол сдвига эдс соседних пазов якоря:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} \text{ градусов электрических}$$

где p – число пар полюсов; Z – число реальных пазов якоря. Угол γ необходим для построения звезды пазовых эдс обмотки. На основании ее строится звезда эдс секции обмотки и соответственно векторная диаграмма обмотки. Векторные диаграммы определяют качество обмотки, в частности степень пульсации эдс якоря.

1. 4. 1. Пример простой четырехполюсной петлевой обмотки якоря с числом элементарных пазов в реальном, равным единице.

Исходные данные:

- тип обмотки – простая петлевая
- кратность обмотки – $m = 1$
- число реальных пазов – $Z = 27$
- число элементарных пазов в реальном – $U_z = 1$
- число полюсов – $2p = 4$
- коэффициент магнитного перекрытия – $\alpha = 0,7$

Выполнить:

- 1) рассчитать обмотку (определить шаги y_1, y_2, y, y_k полюсное деление τ , ширину полюса b_p число коллекторных пластин K , число секций S , угол сдвига эдс соседних пазов γ);
- 2) выполнить развернутую схему обмотки, расставить полюса, щетки на коллекторе;
- 3) выполнить схему параллельных ветвей обмотки;
- 4) построить звезду пазовых эдс;
- 5) построить звезду эдс секций и векторную диаграмму обмотки.

Расчет обмотки проводится в следующем порядке:

- 1) число элементарных пазов определяется по уравнению:

$$Z_{\text{э}} = Z \times U_z = 27 \times 1 = 27$$

- 2) число коллекторных пластин всегда равно числу элементарных пазов:

$$K = Z_{\text{э}} = 27$$

- 3) число секций равно числу элементарных пазов и коллекторных пластин:

$$S = Z_{\text{э}} = K = 27$$

- 4) полюсное деление определяется числом элементарных пазов, приходящихся на один полюс:

$$\tau = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} = \frac{27}{4} = 6,75$$

- 5) первичный шаг обмотки по якору приблизительно равен величине полюсного деления:

$$y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} \pm \varepsilon = 6\frac{3}{4} + \frac{1}{4} = 7$$

Шаги обмотки обязательно должны быть целыми числами.

- 6) результирующий шаг обмотки по якору в простой петлевой обмотке принимается ± 1 , принимаем $y = 1$. Шаг y численно равен шагу по коллектору $y_k, y = y_k$;

- 7) вторичный шаг обмотки по якору:

$$y_2 = y - y_1 = 1 - 7 = -6$$

Знак минус показывает, что шаг y_2 отсчитывается в обратном направлении.

- 8) ширина полюсной дуги:

$$b_p = \alpha \times \tau = 0,7 \times 6,75 = 4,725$$

- 9) угол сдвига эдс соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{27} = 26,66^\circ$$

На основании выполненных расчетов строится развернутая схема обмотки якоря с расстановкой полюсов и щеток на коллекторе (рис. 1. 26). Полюса на развернутой схеме обмотки устанавливаются в середине полюсного деления, а щетки на коллекторе устанавливаются на линии геометрической нейтрали машины. Число щеток всегда принимается равным числу полюсов.

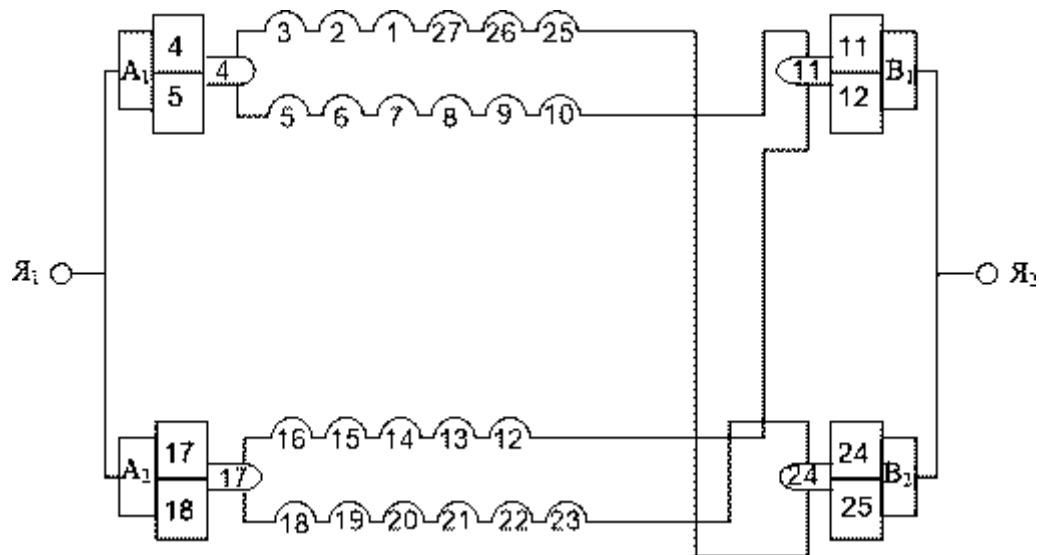


Рис. 1. 27. Схема параллельных ветвей обмотки якоря, развернутая схема которая приведена на рис. 1. 26.

Схема параллельных ветвей обмотки выполняется по развернутой схеме простой петлевой обмотки и изображена на рис 1. 27. По расчетным данным строится звезда пазовых эдс. По звезде пазовых эдс и развернутой схеме обмотки выполняется звезда эдс секций и векторная диаграмма обмотки.

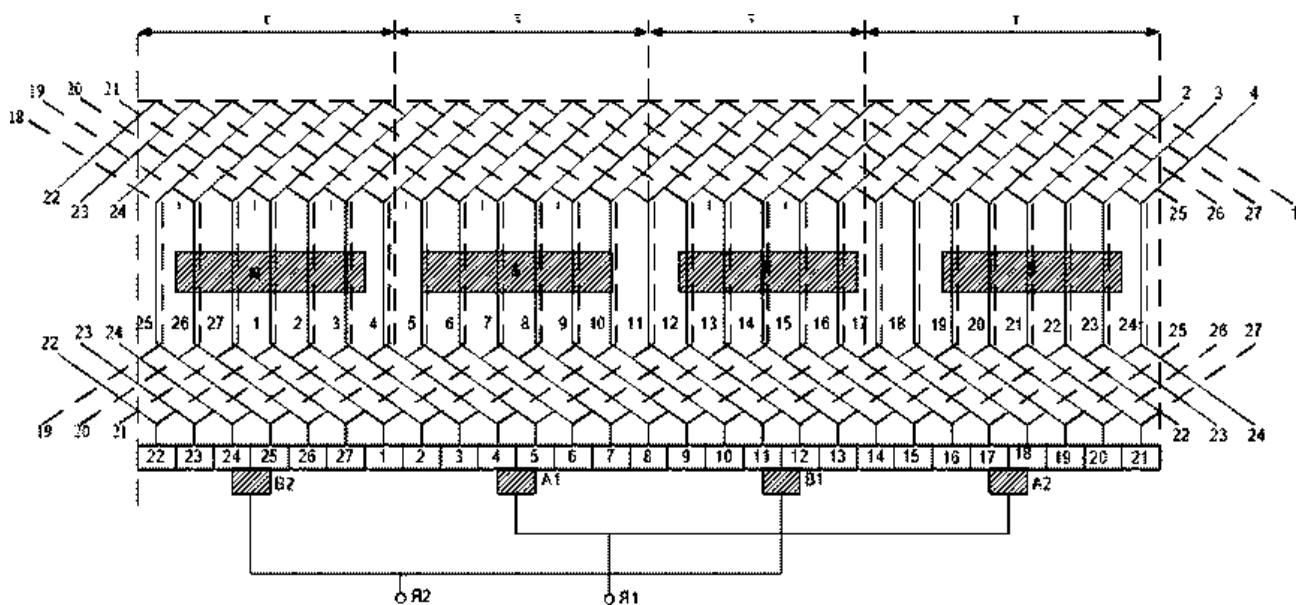


Рис. 1. 26. Развернутая схема простой петлевой обмотки со следующими данными:
 $Z = 27$; $U_z = 1$; $Z_3 = Z \times U_z = 27 \times 1 = 27$; $2p = 4$; $S = K = 27$; $\tau = 6,75$; $y_1 = 7$; $y = y_k = +1$;
 $y_2 = -6$; $bn = 4,725$; $\gamma = 26,66^\circ$

Звезда пазовых эдс обмотки показана на рис. 1. 28. На основании звезды пазовых эдс строится звезда эдс секций.

Построение звезды эдс секций.

e – эдс секции, e_{II} – эдс паза.

$$\begin{array}{llll}
 \bar{e}_1 = \bar{e}_{n1} - \bar{e}_{n8} & \bar{e}_8 = \bar{e}_{n8} - \bar{e}_{n15} & \bar{e}_{15} = \bar{e}_{n15} - \bar{e}_{n22} & \bar{e}_{22} = \bar{e}_{n22} - \bar{e}_{n29} \\
 \bar{e}_2 = \bar{e}_{n2} - \bar{e}_{n9} & \bar{e}_9 = \bar{e}_{n9} - \bar{e}_{n16} & \bar{e}_{16} = \bar{e}_{n16} - \bar{e}_{n23} & \bar{e}_{23} = \bar{e}_{n23} - \bar{e}_{n30} \\
 \bar{e}_3 = \bar{e}_{n3} - \bar{e}_{n10} & \bar{e}_{10} = \bar{e}_{n10} - \bar{e}_{n17} & \bar{e}_{17} = \bar{e}_{n17} - \bar{e}_{n24} & \bar{e}_{24} = \bar{e}_{n24} - \bar{e}_{n31} \\
 \bar{e}_4 = \bar{e}_{n4} - \bar{e}_{n11} & \bar{e}_{11} = \bar{e}_{n11} - \bar{e}_{n18} & \bar{e}_{18} = \bar{e}_{n18} - \bar{e}_{n25} & \bar{e}_{25} = \bar{e}_{n25} - \bar{e}_{n32} \\
 \bar{e}_5 = \bar{e}_{n5} - \bar{e}_{n12} & \bar{e}_{12} = \bar{e}_{n12} - \bar{e}_{n19} & \bar{e}_{19} = \bar{e}_{n19} - \bar{e}_{n26} & \bar{e}_{26} = \bar{e}_{n26} - \bar{e}_{n33} \\
 \bar{e}_6 = \bar{e}_{n6} - \bar{e}_{n13} & \bar{e}_{13} = \bar{e}_{n13} - \bar{e}_{n20} & \bar{e}_{20} = \bar{e}_{n20} - \bar{e}_{n27} & \bar{e}_{27} = \bar{e}_{n27} - \bar{e}_{n34} \\
 \bar{e}_7 = \bar{e}_{n7} - \bar{e}_{n14} & \bar{e}_{14} = \bar{e}_{n14} - \bar{e}_{n21} & \bar{e}_{21} = \bar{e}_{n21} - \bar{e}_{n28} &
 \end{array}$$

Звезда эдс секций для данного примера показана на рис. 1. 29. На основании звезды эдс секций и развернутой схемы обмотки или схемы параллельных ветвей строится векторная диаграмма обмотки, которая показана на рис. 1. 30.

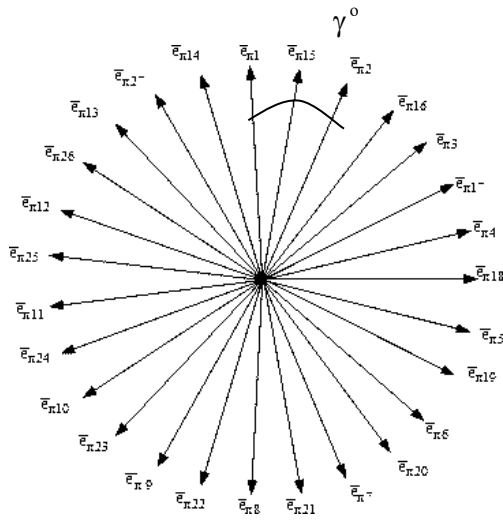


Рис. 1. 28. Звезда пазовых эдс обмотки.

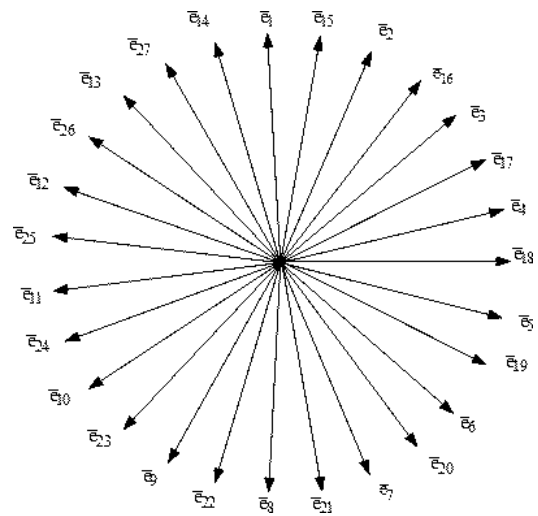


Рис. 1. 29. Звезда эдс секций.

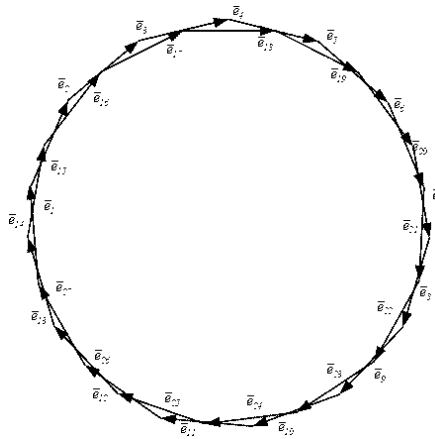


Рис. 1. 30. Векторная диаграмма обмотки.

1. 4. 2. Пример простой четырехполюсной петлевой обмотки якоря с числом элементарных пазов в реальном, равным двум.

Исходные данные:

- тип обмотки – простая петлевая
- кратность обмотки – $m = 1$

- число реальных пазов – $Z = 11$
- число элементарных пазов в реальном – $U_Z = 2$
- число полюсов – $2p = 4$
- коэффициент магнитного перекрытия – $\alpha = 0,7$

Выполнить:

- 1) рассчитать обмотку (определить шаги y_1, y_2, y, y_k , полюсное деление τ , ширину полюса b_p число коллекторных пластин K , число секций S , угол сдвига эдс соседних пазов γ);
- 2) выполнить развернутую схему обмотки, расставить полюса и щетки на коллекторе;
- 3) выполнить схему параллельных ветвей обмотки;
- 4) построить звезду пазовых эдс;
- 5) построить звезду эдс секций и векторную диаграмму обмотки.

Расчет обмотки проводится в следующем порядке:

- 1) число элементарных пазов определяется по уравнению:

$$Z_{\text{э}} = Z \times U_Z = 11 \times 2 = 22$$

- 2) число коллекторных пластин K и число секций S :

$$K = Z_{\text{э}} = S = 22$$

- 3) полюсное деление определяется числом элементарных пазов, приходящихся на один полюс:

$$\tau = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} = \frac{22}{4} = 5,5$$

- 4) первичный шаг обмотки по якору приблизительно равен величине полюсного деления:

$$y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} \pm \varepsilon = \frac{22}{4} + \frac{1}{2} = 6$$

Шаги обмотки обязательно должны быть целыми числами;

- 5) шаг обмотки по коллектору, результирующий шаг обмотки:

$$y_k = \pm 1, \text{ принимаем } y = y_k = +1$$

- 6) второй частичный шаг обмотки (обратный шаг):

$$y_2 = y - y_1 = 1 - 6 = -5$$

Знак "-" показывает, что шаг отсчитывается в обратном направлении. Обмотка будет правоходовая неперекрещивающаяся;

- 7) ширина полюса (полюсной дуги):

$$b_p = \alpha \times \tau = 0,7 \times 5,5 = 3,85$$

- 8) угол сдвига эдс соседних реальных пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{11} = 65,45^\circ$$

где p – число пар полюсов, $p = 2$; Z – число реальных пазов якоря. На основании расчетных данных строится развернутая схема обмотки якоря, которая показана на рис. 1. 32, и соответственно схема параллельных ветвей обмотки (рис. 1. 31).

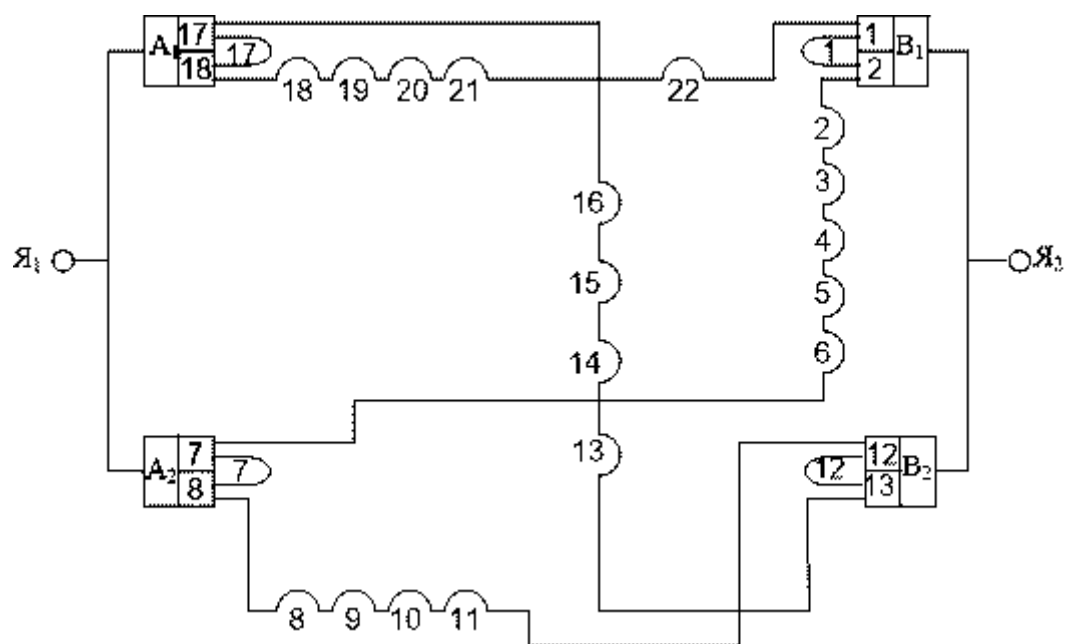


Рис. 1. 31. Схема параллельных ветвей обмотки.

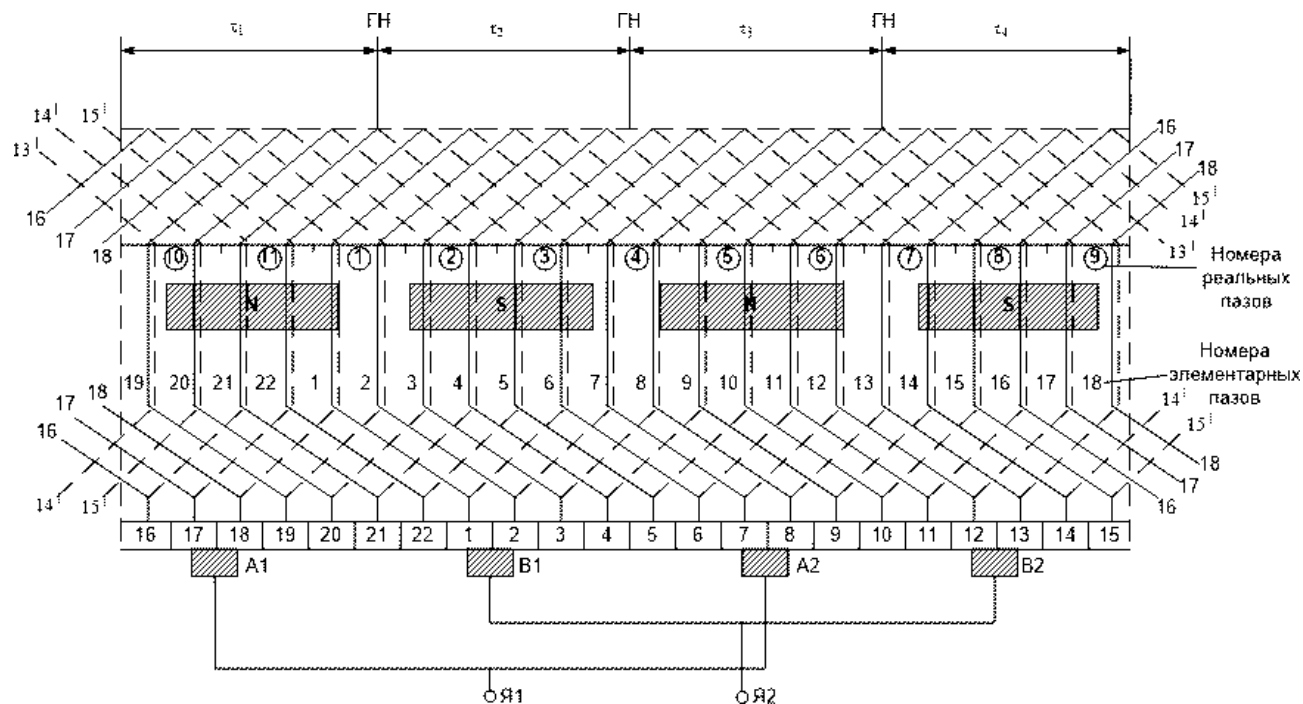


Рис. 1. 32. Развернутая схема простой петлевой обмотки:
 $Z = 11$; $U_z = 2$; $Z_3 = 22$; $\tau = 5,5$; $y_1 = 6$; $y = y_k = +1$; $y_2 = -5$; $bn = 3,85$; $\gamma = 65,45^\circ$

По расчетным данным строится звезда пазовых эдс обмотки (рис. 1. 33).

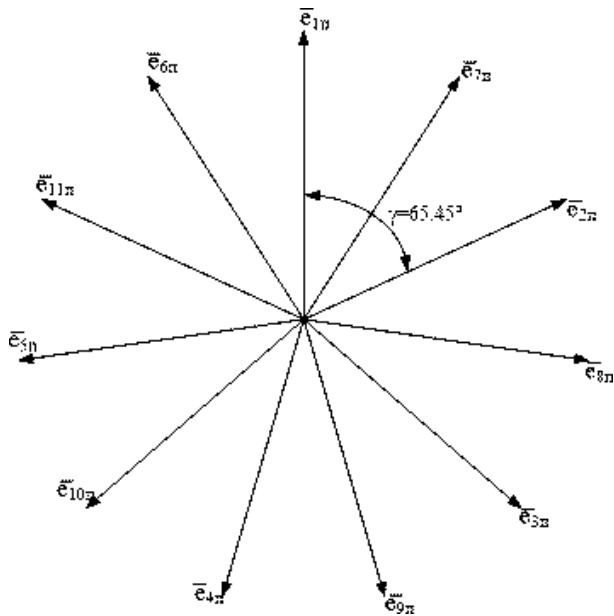


Рис. 1. 33.
Звезда пазовых эдс обмотки якоря.

Согласно звезды пазовых эдс и развернутой схемы обмотки строится звезда эдс секций обмотки якоря.

$$\begin{aligned}
 \bar{e}_1 &= \bar{e}_{n1} - \bar{e}_{n4} & \bar{e}_9 &= \bar{e}_{n5} - \bar{e}_{n8} & \bar{e}_{16} &= \bar{e}_{n8} - \bar{e}_{n11} \\
 \bar{e}_2 &= \bar{e}_{n1} - \bar{e}_{n4} & \bar{e}_{10} &= \bar{e}_{n5} - \bar{e}_{n8} & \bar{e}_{17} &= \bar{e}_{n9} - \bar{e}_{n1} \\
 \bar{e}_3 &= \bar{e}_{n2} - \bar{e}_{n5} & \bar{e}_{11} &= \bar{e}_{n6} - \bar{e}_{n9} & \bar{e}_{18} &= \bar{e}_{n9} - \bar{e}_{n1} \\
 \bar{e}_4 &= \bar{e}_{n2} - \bar{e}_{n5} & \bar{e}_{12} &= \bar{e}_{n6} - \bar{e}_{n9} & \bar{e}_{19} &= \bar{e}_{n10} - \bar{e}_{n2} \\
 \bar{e}_5 &= \bar{e}_{n3} - \bar{e}_{n6} & \bar{e}_{13} &= \bar{e}_{n7} - \bar{e}_{n10} & \bar{e}_{20} &= \bar{e}_{n10} - \bar{e}_{n2} \\
 \bar{e}_6 &= \bar{e}_{n3} - \bar{e}_{n6} & \bar{e}_{14} &= \bar{e}_{n7} - \bar{e}_{n10} & \bar{e}_{21} &= \bar{e}_{n11} - \bar{e}_{n3} \\
 \bar{e}_7 &= \bar{e}_{n4} - \bar{e}_{n7} & \bar{e}_{15} &= \bar{e}_{n8} - \bar{e}_{n11} & \bar{e}_{22} &= \bar{e}_{n11} - \bar{e}_{n3} \\
 \bar{e}_8 &= \bar{e}_{n4} - \bar{e}_{n7}
 \end{aligned}$$

Порядок построения звезды эдс секции поясняет рис. 1. 34, а сама звезда эдс секции на рис. 1. 35.

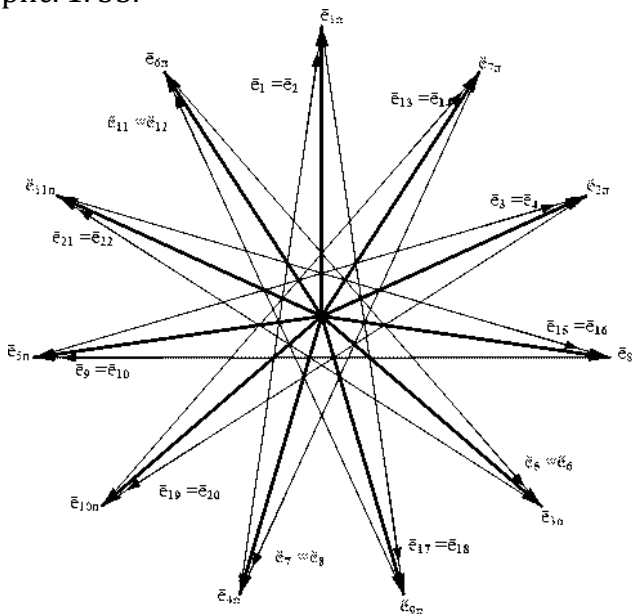


Рис. 1. 34. Порядок построения звезды эдс секций.

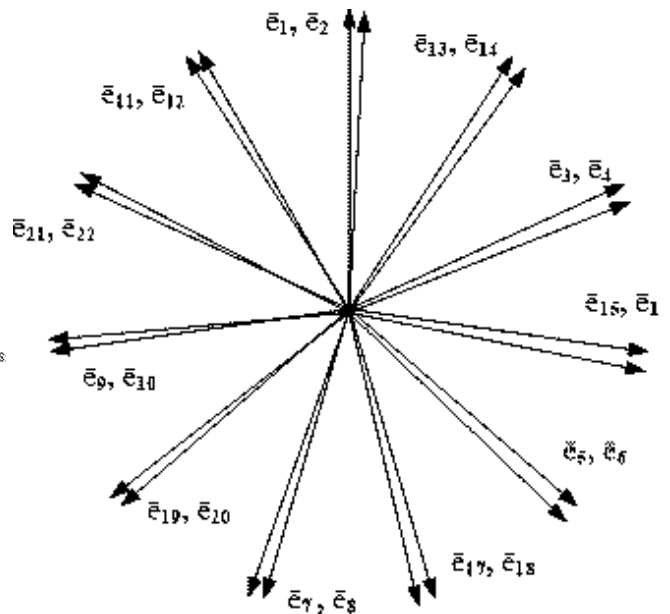


Рис. 1. 35. Звезда эдс секций обмотки.

На основании звезды эдс секции и развернутой схемы обмотки строится векторная диаграмма обмотки, которая представлена на рис. 1. 36.

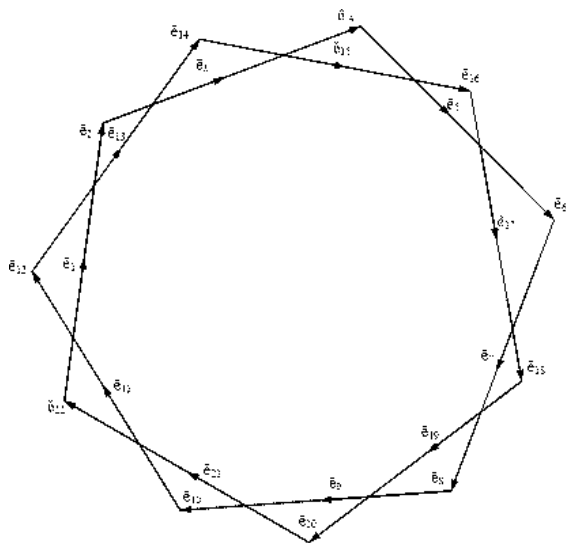


Рис. 1. 36. Векторная диаграмма обмотки.

1. 4. 3. Пример простой петлевой обмотки с числом элементарных пазов в реальном, равным трем.

Исходные данные:

- тип обмотки – простая петлевая
- кратность обмотки $m = 1$
- число реальных пазов $Z = 10$
- число элементарных пазов в реальном $U_Z = 3$
- число полюсов $2p = 4$
- коэффициент магнитного перекрытия $\alpha = 0,65$

Выполнить

- 1) рассчитать обмотку, определив шаги обмоток, полюсное деление и другие величины $y_1, y_2, y, y_k, \tau, bn, K, S, \gamma$.
- 2) выполнить развернутую схему обмотки, расставить полюса и щетки на коллекторе;
- 3) выполнить схему параллельных ветвей обмотки;
- 4) построить звезду пазовых эдс ;
- 5) построить звезду эдс секций и векторную диаграмму обмотки.

Расчет обмотки проводится в следующем порядке:

- 1) расчет числа элементарных пазов якоря:

$$Z_{\text{я}} = Z \times U_Z = 10 \times 3 = 30$$

- 2) расчет полюсного деления якоря:

$$\tau = \frac{Z_{\text{я}}}{2p} = \frac{30}{4} = 7,5$$

- 3) определение первого частичного шага обмотки по якорю:

$$y_1 = \frac{Z_{\text{я}}}{2p} \pm \varepsilon = 7,5 - 0,5 = 7$$

- 4) шаг обмотки по коллектору и результирующий шаг обмотки принимается:

$$y = y_k = +1$$

- 5) определение второго частичного шага обмотки (обратный шаг):

$$y_2 = y - y_1 = 1 - 7 = -6$$

6) ширина полюса:

$$b_{\text{п}} = \alpha \times \tau = 0,65 \times 7,5 = 4,875$$

7) определение угла сдвига эдс соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{10} = 72^\circ$$

8) число секций обмотки якоря:

$$S = Z_3 = 30$$

9) число коллекторных пластин коллектора $K = S = 30$.

На основании расчетных данных строится развернутая схема обмотки, на которой расставляются полюса и щетки на коллекторе (рис. 1. 38). Схема параллельных ветвей обмотки и звезда пазовых эдс представлены на рис. 1. 37, 1. 39, а звезда эдс секций на рис. 1. 40.

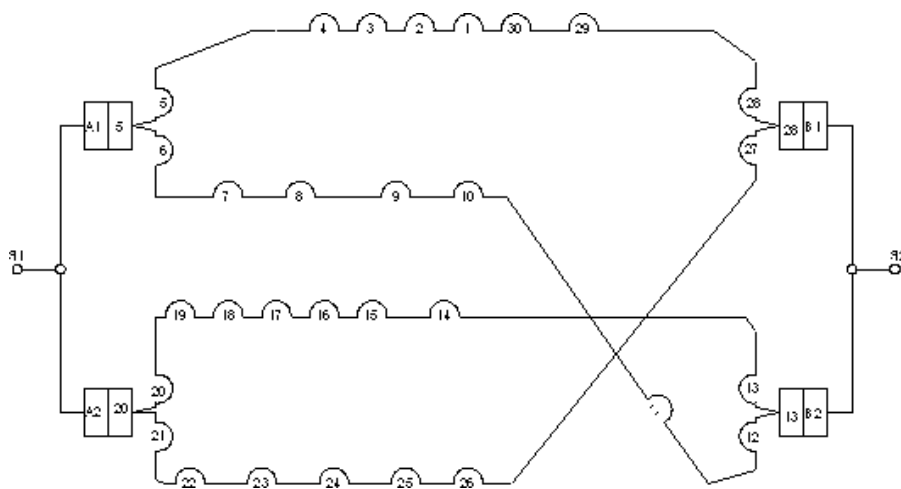


Рис. 1. 37. Схема параллельных ветвей обмотки.

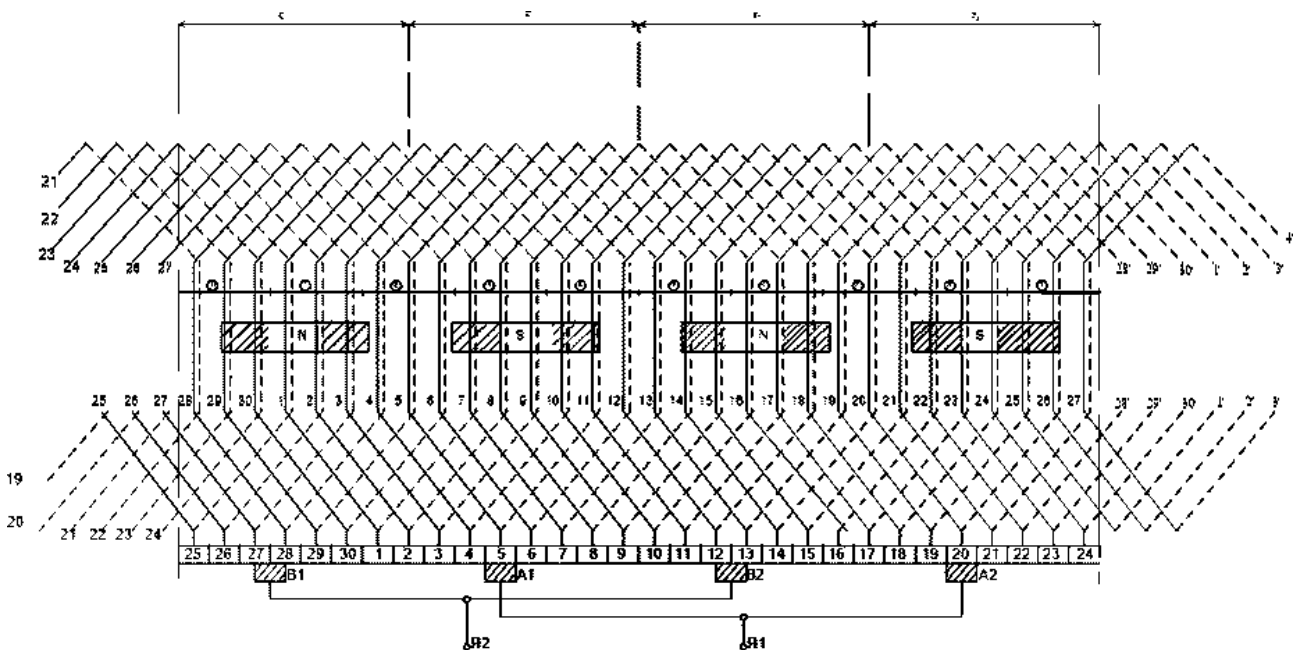


Рис. 1. 38. Развернутая схема простой петлевой обмотки:

$$Z = 10, U_Z = 3, Z_3 = 30, K = 30, S = 30, y_1 = 7, y_2 = -6, y = y_k = 1, 2p = 4.$$

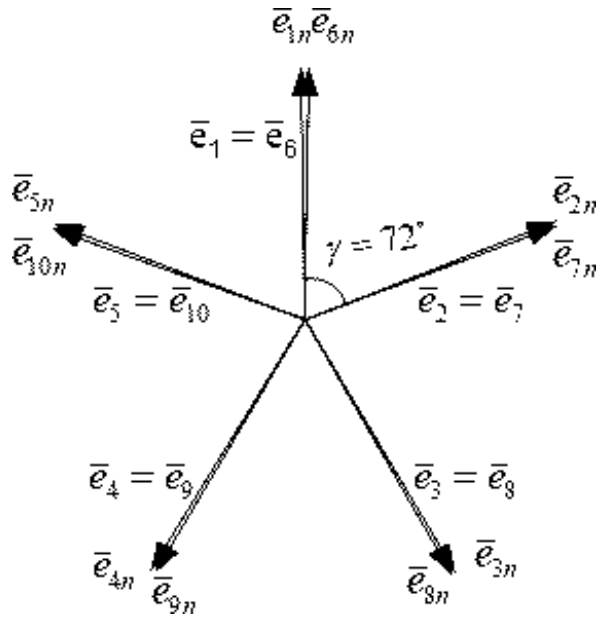


Рис. 1. 39 Звезда пазовых эдс обмотки якоря.

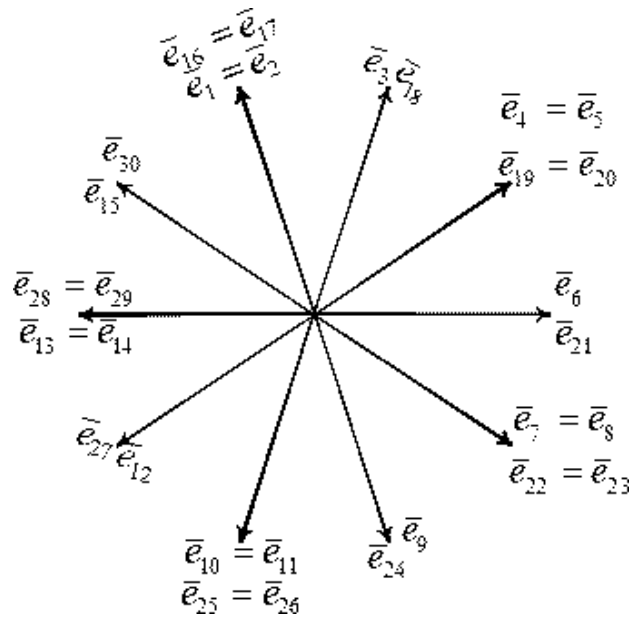


Рис. 1. 40. Звезда эдс секций обмотки якоря.

Определение отдельных эдс секций для построения звезды эдс.

$$\begin{aligned}\bar{e}_1 &= \bar{e}_{1n} - \bar{e}_{3n} \\ \bar{e}_2 &= \bar{e}_{1n} - \bar{e}_{3n} \\ \bar{e}_3 &= \bar{e}_{1n} - \bar{e}_{4n} \\ \bar{e}_4 &= \bar{e}_5 = \bar{e}_{2n} - \bar{e}_{4n} \\ \bar{e}_6 &= \bar{e}_{2n} - \bar{e}_{5n} \\ \bar{e}_8 &= \bar{e}_7 = \bar{e}_{3n} - \bar{e}_{5n} \\ \bar{e}_9 &= \bar{e}_{3n} - \bar{e}_{6n}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{e}_{10} &= \bar{e}_{11} = \bar{e}_{4n} - \bar{e}_{6n} \\ \bar{e}_{12} &= \bar{e}_{4n} - \bar{e}_{7n} \\ \bar{e}_{13} &= \bar{e}_{14} = \bar{e}_{5n} - \bar{e}_{7n} \\ \bar{e}_{15} &= \bar{e}_{5n} - \bar{e}_{8n} \\ \bar{e}_{16} &= \bar{e}_{17} = \bar{e}_{6n} - \bar{e}_{8n} \\ \bar{e}_{18} &= \bar{e}_{6n} - \bar{e}_{9n} \\ \bar{e}_{19} &= \bar{e}_{20} = \bar{e}_{7n} - \bar{e}_{9n}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{e}_{21} &= \bar{e}_{7n} - \bar{e}_{10n} \\ \bar{e}_{22} &= \bar{e}_{23} = \bar{e}_{8n} - \bar{e}_{10n} \\ \bar{e}_{24} &= \bar{e}_{8n} - \bar{e}_{1n} \\ \bar{e}_{25} &= \bar{e}_{26} = \bar{e}_{9n} - \bar{e}_{1n} \\ \bar{e}_{27} &= \bar{e}_{9n} - \bar{e}_{2n} \\ \bar{e}_{28} &= \bar{e}_{29} = \bar{e}_{10n} - \bar{e}_{2n} \\ \bar{e}_{30} &= \bar{e}_{10n} - \bar{e}_{3n}\end{aligned}$$

На основании звезды эдс секций и развернутой схемы обмотки строится векторная диаграмма обмотки (рис. 1. 41).

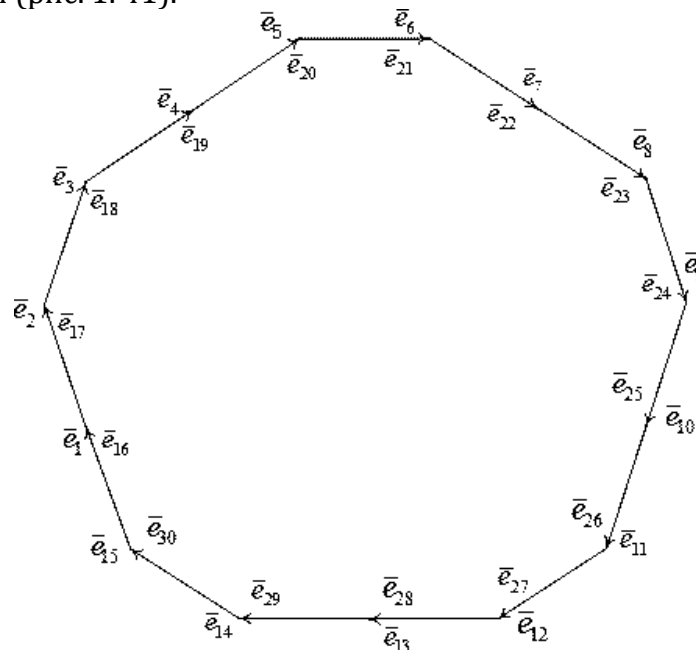


Рис. 1. 41. Векторная диаграмма обмотки.

1. 5. Сложные петлевые обмотки.

1. 5. 1. Общие сведения о сложных петлевых обмотках.

Сложная или многоходовая петлевая обмотка представляет совокупность нескольких простых обмоток. Число простых обмоток в сложных называется кратностью обмотки и обозначается буквой m . Теоретически m может быть любым целым числом ($m = 2, 3, 4$ и т. д.). На практике обычно применяются обмотки с кратностью $m = 2$. Большое число простых обмоток в сложных используется в специальных машинах, рассчитанных на очень большой ток и малое напряжение. Ширина щеток на коллекторе в сложных обмотках должна быть не меньше m коллекторных делений.

Таким образом, простые обмотки, составляющие сложную включаются параллельно с помощью щеток, поэтому количество параллельных ветвей в сложной петлевой обмотке $a = 2p \times m$.

Результирующий шаг y обмотки по элементарным пазам якоря и шаг обмотки по коллектору y_k сложной петлевой обмотки:

$$y = y_k = \pm m$$

Шаги обмотки y и $y_2 = y - y_1$ и определяются по тем же формулам, что и для простой петлевой обмотки. Сложные обмотки обычно применяются в машинах большой мощности с большими значениями токов якоря, причем секции обмотки выполняются одновитковыми стержневыми. Различают сложные петлевые обмотки однократнозамкнутые и многократнозамкнутые. Например, если $Z_{\Sigma} = 17$, $2p = 2$, $m = \pm 2$ обмотка получается однократнозамкнутой, что наглядно видно из рис. 1. 42.

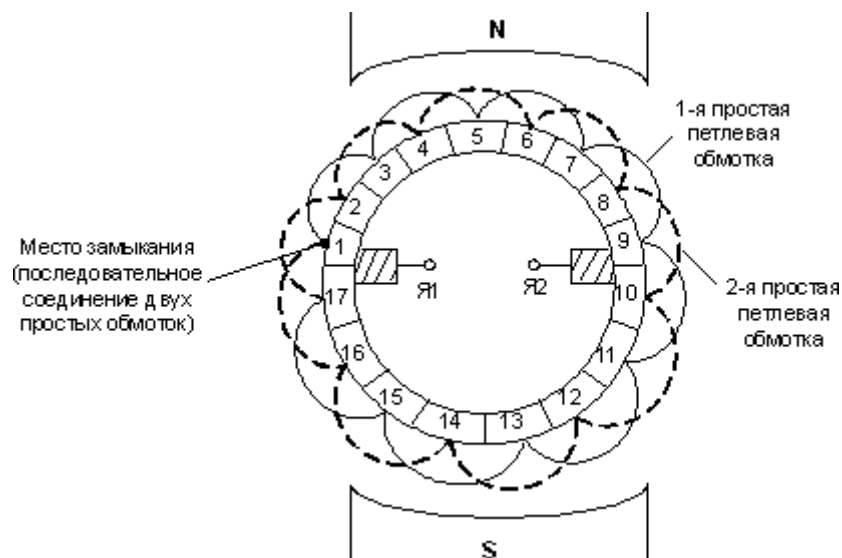


Рис. 1. 42. Принципиальная схема сложной петлевой обмотки однократнозамкнутой с $Z_{\Sigma} = 17$, $2p = 2$, $m = \pm 2$, $y_k = \pm 2$.

Как видно из рис. 1. 42, первая простая обмотка начинается с первой пластины коллектора и секции подключаются только к нечетным коллекторным пластинам и последняя секция этой обмотки заканчивается на 17 пластине. Далее от 17-й пластины последовательно выполняется вторая простая петлевая обмотка, секции которой подключаются только к четным коллекторным пластинам коллектора. Заканчивается вторая простая обмотка на первой пластине коллектора, на которой начинается первая простая обмотка.

Таким образом, первая и вторая простые петлевые обмотки оказались включенными в общую схему последовательно и ее называют однократнозамкнутой сложной петлевой обмоткой.

Если примем число элементарных пазов, число полюсов и кратность обмотки четными числами ($Z_\varepsilon = 18, 2p = 2, m = +2$), то сложная петлевая обмотка получается параллельной двухкратнозамкнутой. Это наглядно подтверждает рис. 1. 43.

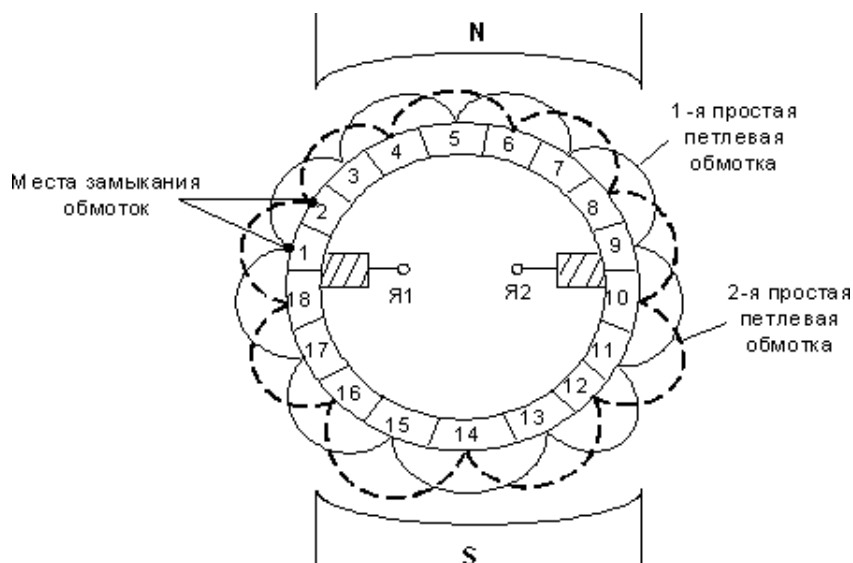


Рис. 1. 43. Принципиальная схема двухкратнозамкнутой параллельной сложной петлевой обмотки с $Z_\varepsilon = 18, 2p = 2, m = +2, yk = +2$.

Как видно из рис. 1. 43, первая простая обмотка начинается на первой пластине коллектора, секции проходят все нечетные пластины коллектора и последняя секция обмотки заканчивается на первой пластине коллектора. Таким образом, первая обмотка замыкается на первой пластине и является отдельной простой петлевой обмоткой. Вторая простая петлевая обмотка начинается со второй пластины коллектора, секции проходят по всем четным пластинам и последняя секция обмотки заканчивается на второй пластине. И она представляет собой также отдельную простую петлевую обмотку.

Таким образом, на якоре выполняют две простые петлевые обмотки, которые электрически не связаны друг с другом и составляют сложную параллельную петлевую обмотку. Электрически обмотки объединяются посредством щеток на коллекторе. Чтобы обеспечить надежную электрическую связь обмоток ширина щеток должна быть не менее ширины двух коллекторных пластин.

1. 5. 2. Пример сложной петлевой обмотки с числом элементарных пазов в реальном, равным трем.

Исходные данные:

- тип обмотки – сложная петлевая
- кратность обмотки $m = 2$
- число реальных пазов $Z = 14$
- число элементарных пазов в реальном $U_z = 3$
- число полюсов $2p = 6$
- коэффициент магнитного перекрытия $\alpha = 0,65$

Выполнить:

- 1) рассчитать обмотку (определить шаги y_1, y_2, y, yk , полюсное деление τ , ширину полюса b_n , число коллекторных пластин K , число секций S , угол сдвига ε соседних пазов γ);
- 2) выполнить развернутую схему обмотки, расставить полюса, щетки на коллекторе;
- 3) выполнить схему параллельных ветвей обмотки;
- 4) построить звезду пазовых $\varepsilon d c$;
- 5) построить звезду $\varepsilon d c$ секций и векторную диаграмму обмотки.

Расчет обмотки проводится в следующем порядке:

1) число элементарных пазов:

$$Z_{\text{э}} = Z \times U_z = 14 \times 3 = 42$$

2) число секций обмотки: $S = Z_{\text{э}} = 42$

3) число коллекторных пластин коллектора $K = S = Z_{\text{э}} = 42$

4) полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} = \frac{42}{6} = 7$$

5) первый частичный шаг обмотки:

$$y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} \pm \varepsilon = 7$$

6) результирующий шаг обмотки $y = y_k = \pm m = 2$

7) второй частичный шаг обмотки $y_2 = y - y_1 = 2 - 7 = -5$

8) шаг по коллектору $y_k = \pm m = 2$

9) ширина полюса $b_{\text{п}} = \alpha \times \tau = 0,65 \times 7 = 4,55$

10) угол сдвига эдс соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{3 \times 360}{14} = 77^\circ$$

На основании расчетов строится развернутая схема обмотки якоря, (рис. 1. 46). На основании развернутой схемы обмотки строится схема параллельных ветвей (рис. 1. 44). По расчетному углу сдвига эдс соседних пазов строится звезда пазовых эдс (рис. 1. 45).

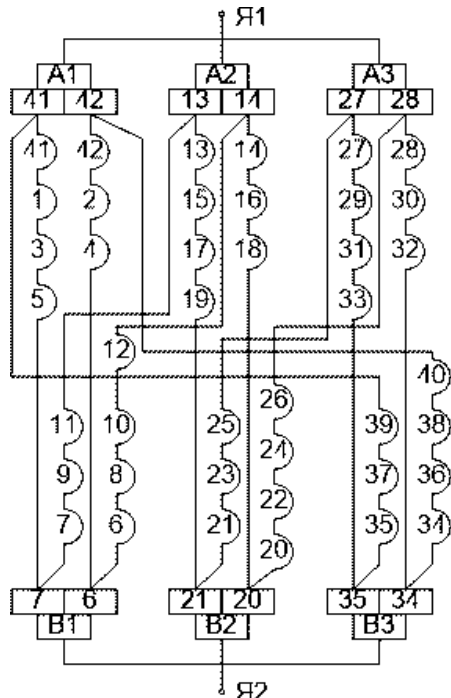


Рис. 1. 44. Схема параллельных ветвей сложной петлевой обмотки.

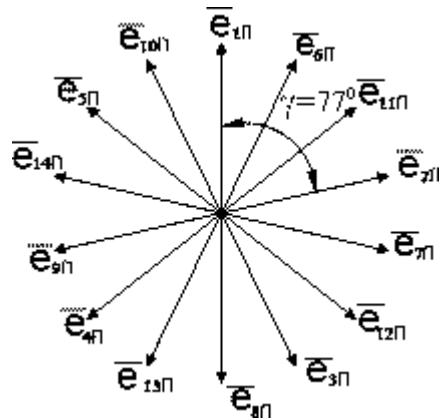


Рис. 1. 45. Звезда пазовых эдс.

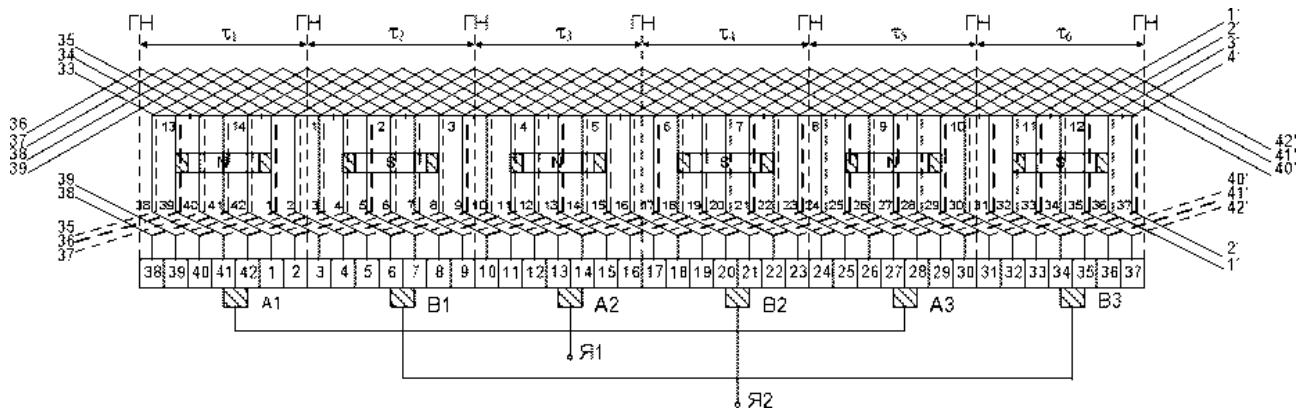


Рис. 1. 46. Развернутая схема сложной петлевой обмотки:
 $2p = 6$; $Z = 14$; $Z_3 = 42$; $U_z = 3$; $\tau = 7$; $y_1 = 7$; $y_k = y = 2$; $y_2 = -5$

Определение $\bar{e}ds$ отдельных секций якоря согласно схеме обмотки и звезды пазовых $\bar{e}ds$

$\bar{e}_1 = \bar{e}_2 = \bar{e}_{1п} - \bar{e}_{3п}$	$\bar{e}_{13} = \bar{e}_{14} = \bar{e}_{5п} - \bar{e}_{7п}$	$\bar{e}_{25} = \bar{e}_{26} = \bar{e}_{9п} - \bar{e}_{11п}$	$\bar{e}_{37} = \bar{e}_{38} \bar{e}_{13п} - \bar{e}_{1п}$
$\bar{e}_3 = \bar{e}_{1п} - \bar{e}_{4п}$	$\bar{e}_{15} = \bar{e}_{5п} - \bar{e}_{8п}$	$\bar{e}_{27} = \bar{e}_{9п} - \bar{e}_{12п}$	$\bar{e}_{39} = \bar{e}_{13п} - \bar{e}_{2п}$
$\bar{e}_5 = \bar{e}_4 = \bar{e}_{2п} - \bar{e}_{4п}$	$\bar{e}_{16} = \bar{e}_{17} = \bar{e}_{6п} - \bar{e}_{8п}$	$\bar{e}_{28} = \bar{e}_{29} = \bar{e}_{10п} - \bar{e}_{12п}$	$\bar{e}_{40} = \bar{e}_{41} = \bar{e}_{14п} - \bar{e}_{2п}$
$\bar{e}_6 = \bar{e}_{2п} - \bar{e}_{5п}$	$\bar{e}_{18} = \bar{e}_{6п} - \bar{e}_{9п}$	$\bar{e}_{30} = \bar{e}_{10п} - \bar{e}_{13п}$	$\bar{e}_{42} = \bar{e}_{14п} - \bar{e}_{3п}$
$\bar{e}_8 = \bar{e}_7 = \bar{e}_{3п} - \bar{e}_{5п}$	$\bar{e}_{19} = \bar{e}_{20} = \bar{e}_{3п} - \bar{e}_{9п}$	$\bar{e}_{31} = \bar{e}_{32} = \bar{e}_{11п} - \bar{e}_{13}$	
$\bar{e}_9 = \bar{e}_{3п} - \bar{e}_{6п}$	$\bar{e}_{21} = \bar{e}_{7п} - \bar{e}_{10п}$	$\bar{e}_{33} = \bar{e}_{11п} - \bar{e}_{14п}$	
$\bar{e}_{11} = \bar{e}_{10} = \bar{e}_{4п} - \bar{e}_{6п}$	$\bar{e}_{22} = \bar{e}_{23} = \bar{e}_{8п} - \bar{e}_{10п}$	$\bar{e}_{34} = \bar{e}_{35} = \bar{e}_{12} - \bar{e}_{14}$	
$\bar{e}_{12} = \bar{e}_{4п} - \bar{e}_{7п}$	$\bar{e}_{24} = \bar{e}_{8п} - \bar{e}_{11}$	$\bar{e}_{36} = \bar{e}_{12п} - \bar{e}_{1п}$	

Звезда $\bar{e}ds$ секций показана на рис. 1. 47.

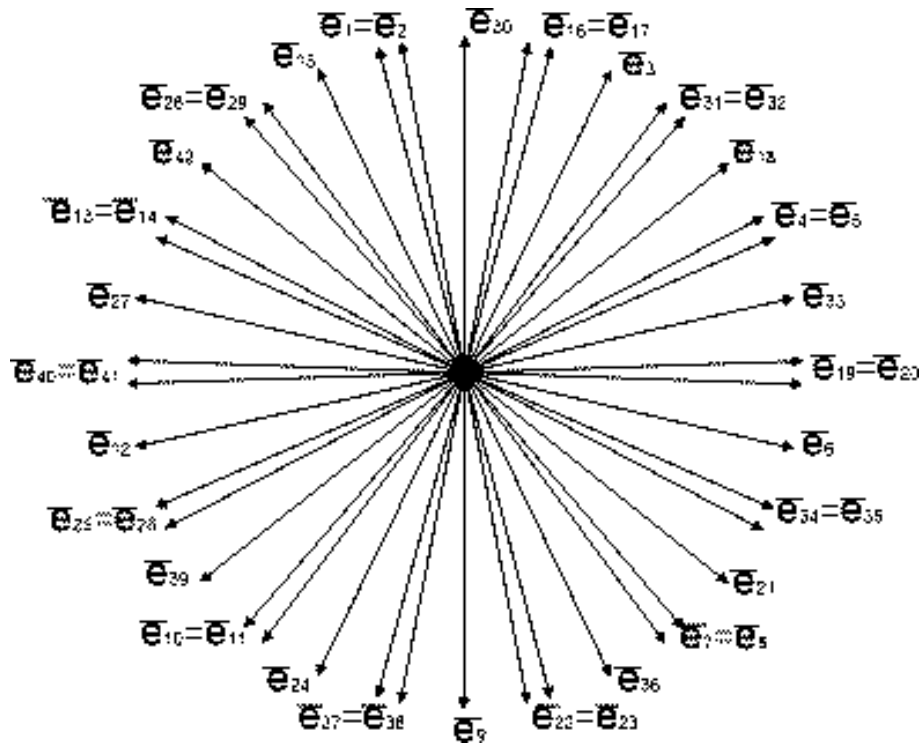


Рис. 1. 47. Звезда $\bar{e}ds$ секций обмотки якоря.

Векторная диаграмма обмотки строится по схеме обмотки с учетом звезды $\bar{e}ds$ секций (рис. 1. 48).

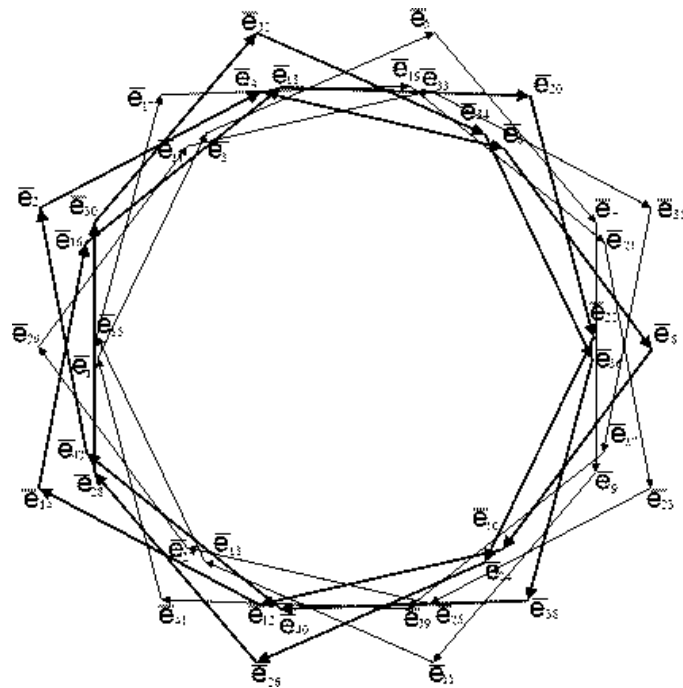


Рис. 1. 48. Векторная диаграмма обмотки.

1. 6. Простые волновые обмотки.

Особенностью волновой обмотки является то, что намотка ее на якорь осуществляется волнами и шаг по коллектору не принимается как в петлевых обмотках, а рассчитывается. Как и в петлевых обмотках, результирующий шаг обмотки по якорю y в зубцовых делениях должен быть равен шагу по коллектору в коллекторных делениях и шаг по коллектору рассчитывается по следующему уравнению:

$$yk = y = \frac{K \pm 1}{p} = \text{целое число}$$

Шаг по коллектору yk и результирующий шаг должны быть равны целому числу.

В этом уравнении K – число коллекторных пластин коллектора $K = Z_3 = S$; p – число пар полюсов машины. Если для заданных значений K , p и yk не равен целому числу, то нормальная простая обмотка не получается.

При необходимости выполнения простой волновой обмотки применяются искусственные приемы. Так, может быть выполнена обмотка с "мертвой секцией" или обмотка искусственно замкнутая. Примеры расчета таких обмоток и схемы их выполнения приведены ниже.

Расчет шага y_1 выполняется по тому же выражению, что и для петлевых обмоток, т. е.:

$$y_1 = \frac{Z_3}{2p} \pm \varepsilon = \text{целое число}$$

Второй частичный шаг определяется по выражению:

$$y_2 = y - y_1$$

Число параллельных ветвей простой волновой обмотки $a = 2$ не зависит от числа полюсов. Методику расчета простых волновых обмоток и выполнения развернутых схем, схем параллельных ветвей, векторных диаграмм обмоток поясняют приведенные примеры.

1. 6. 1. Пример простой волновой четырехполюсной обмотки якоря с числом элементарных пазов в реальном равным единице.

Исходные данные:

- тип обмотки – простая волновая
- кратность обмотки – $m = 1$
- число реальных пазов – $Z = 29$
- число элементарных пазов в реальном – $U_Z = 1$
- число полюсов – $2p = 6$;
- коэффициент магнитного перекрытия – $\alpha = 0,7$

Выполнить:

- 1) рассчитать обмотку (определить шаги y_1, y_2, y, y_k полюсное деление τ , ширину полюса bn , число коллекторных пластин K , число секций S , угол сдвига эдс соседних пазов γ);
- 2) выполнить развернутую схему обмотки, расставить полюса, щетки на коллекторе;
- 3) выполнить схему параллельных ветвей обмотки;
- 4) построить звезду пазовых эдс;
- 5) построить звезду эдс секций и векторную диаграмму обмотки.

Расчет обмотки проводится в следующем порядке:

- 1) число элементарных пазов:

$$Z_{\text{э}} = Z \times U_Z = 29 \times 1 = 29$$

- 2) число секций обмотки:

$$S = Z_{\text{э}} = 29$$

- 3) число коллекторных пластин коллектора:

$$K = S = Z_{\text{э}} = 29$$

- 4) полюсное деление якоря:

$$\tau = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} = \frac{29}{6} = 4,8$$

- 5) первый частичный шаг обмотки по якорю:

$$y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} \pm \varepsilon = 4,8 + \frac{1}{6} = 5$$

- 6) результирующий шаг обмотки, шаг по коллектору:

$$y = y_k = \frac{K \pm m}{p} = \frac{29 + 1}{3} = 10$$

- 7) второй частичный шаг обмотки по якорю:

$$y_2 = y - y_1 = 10 - 5 = 5$$

- 8) ширина полюсной дуги:

$$bn = \tau \times \alpha = 5 \times 0,7 = 3,5$$

- 9) угол сдвига эдс соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{3 \times 360^\circ}{29} = 37,24^\circ$$

На основании расчетных данных строится развернутая схема простой волновой обмотки (рис. 1. 49). Схема параллельных ветвей обмотки якоря приведена на рис. 1. 49.

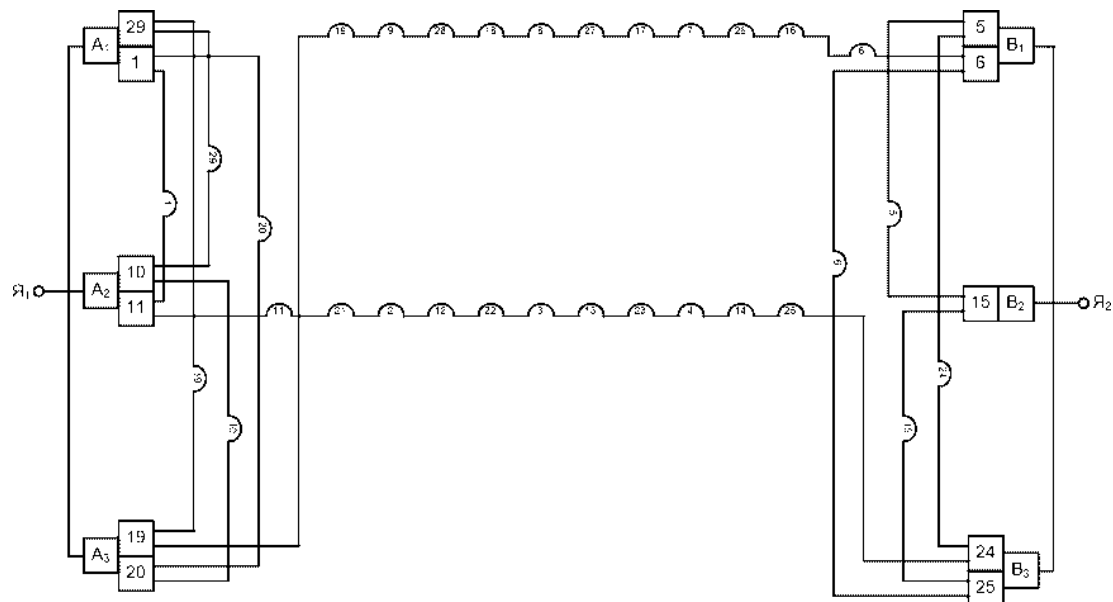


Рис. 1. 49. Схема параллельных ветвей обмотки, развернутая схема которой показана на рис. 1. 50.

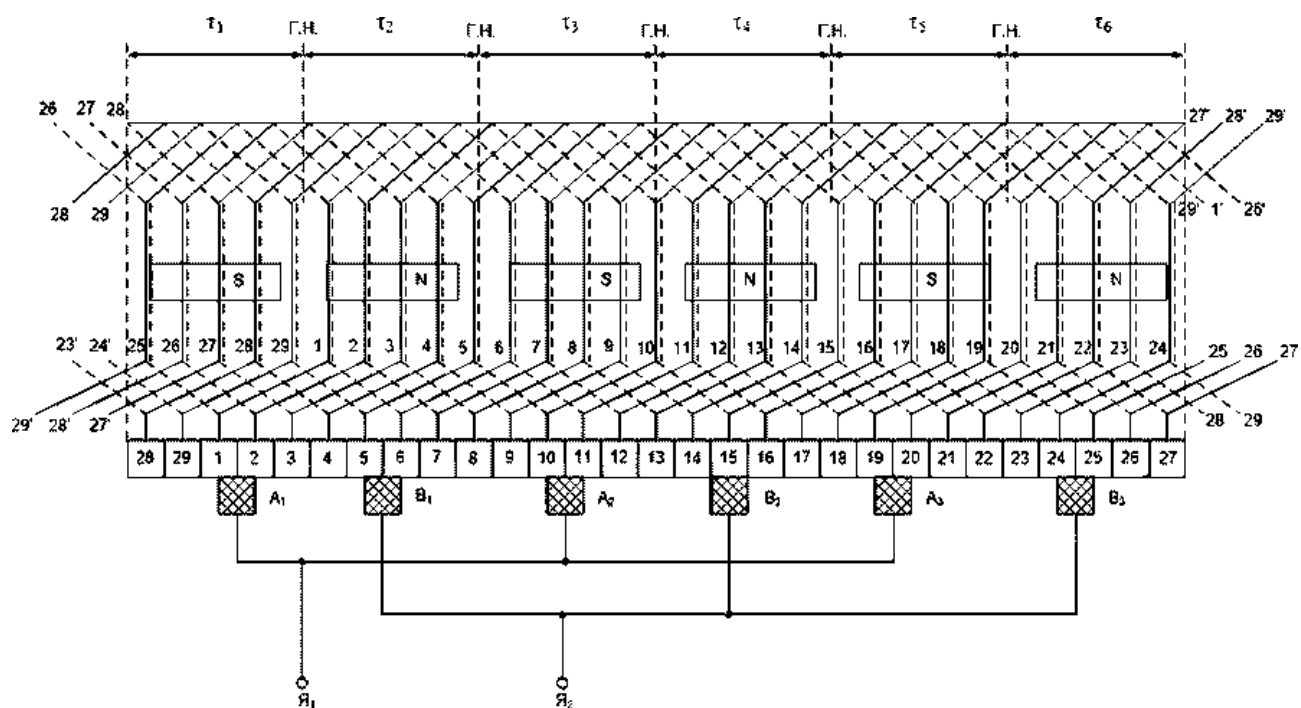


Рис. 1. 49. Развернутая схема простой волновой обмотки якоря:
 $Z = Z_3 = 29$, $U_Z = 1$, $y_1 = 5$, $y_2 = 5$, $y = y_k = 10$, $bn = 3,5$, $2p = 6$.

Согласно схеме обмотки *эдс* секций определяются следующими уравнениями:

$$\begin{array}{lll}
 \bar{e}_1 = \bar{e}_{1п} - \bar{e}_{6п} & \bar{e}_{11} = \bar{e}_{11п} - \bar{e}_{16п} & \bar{e}_{21} = \bar{e}_{21п} - \bar{e}_{26п} \\
 \bar{e}_2 = \bar{e}_{2п} - \bar{e}_{7п} & \bar{e}_{12} = \bar{e}_{12п} - \bar{e}_{17п} & \bar{e}_{22} = \bar{e}_{22п} - \bar{e}_{27п} \\
 \bar{e}_3 = \bar{e}_{3п} - \bar{e}_{8п} & \bar{e}_{13} = \bar{e}_{13п} - \bar{e}_{18п} & \bar{e}_{23} = \bar{e}_{23п} - \bar{e}_{28п} \\
 \bar{e}_4 = \bar{e}_{4п} - \bar{e}_{9п} & \bar{e}_{14} = \bar{e}_{14п} - \bar{e}_{19п} & \bar{e}_{24} = \bar{e}_{24п} - \bar{e}_{29п} \\
 \bar{e}_5 = \bar{e}_{5п} - \bar{e}_{10п} & \bar{e}_{15} = \bar{e}_{15п} - \bar{e}_{20п} & \bar{e}_{25} = \bar{e}_{25п} - \bar{e}_{1п} \\
 \bar{e}_6 = \bar{e}_{6п} - \bar{e}_{11п} & \bar{e}_{16} = \bar{e}_{16п} - \bar{e}_{21п} & \bar{e}_{26} = \bar{e}_{26п} - \bar{e}_{2п} \\
 \bar{e}_7 = \bar{e}_{7п} - \bar{e}_{12п} & \bar{e}_{17} = \bar{e}_{17п} - \bar{e}_{22п} & \bar{e}_{27} = \bar{e}_{27п} - \bar{e}_{3п} \\
 \bar{e}_8 = \bar{e}_{8п} - \bar{e}_{13п} & \bar{e}_{18} = \bar{e}_{18п} - \bar{e}_{23п} & \bar{e}_{28} = \bar{e}_{28п} - \bar{e}_{4п} \\
 \bar{e}_9 = \bar{e}_{9п} - \bar{e}_{14п} & \bar{e}_{19} = \bar{e}_{19п} - \bar{e}_{24п} & \bar{e}_{29} = \bar{e}_{29п} - \bar{e}_{5п} \\
 \bar{e}_{10} = \bar{e}_{10п} - \bar{e}_{15п} & \bar{e}_{20} = \bar{e}_{20п} - \bar{e}_{25п} &
 \end{array}$$

Порядок построения векторов *эдс* секций показан на рис. 1. 51.

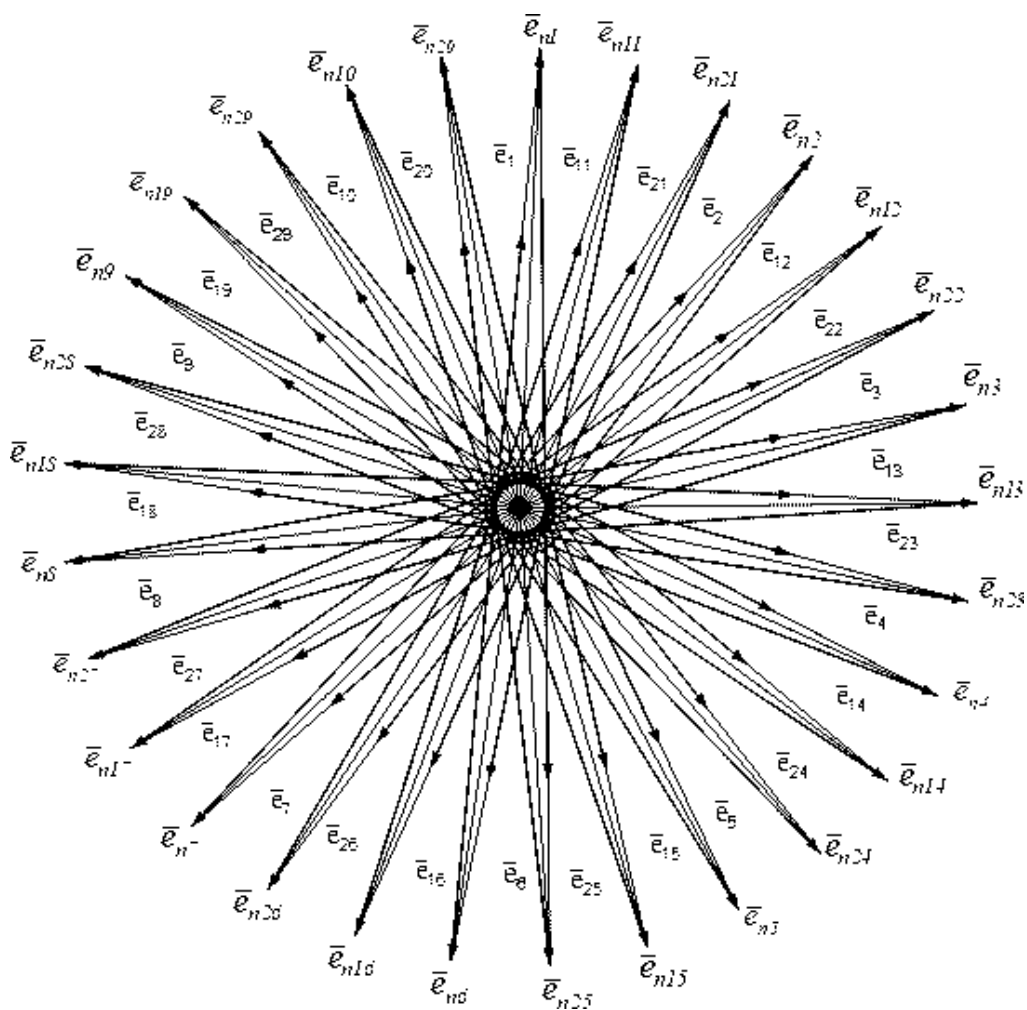


Рис.1. 51. Порядок построения *эдс* секции по звезде пазовых *эдс* и схеме обмотки.

Звезда пазовых *эдс* обмотки на рис. 1. 52.

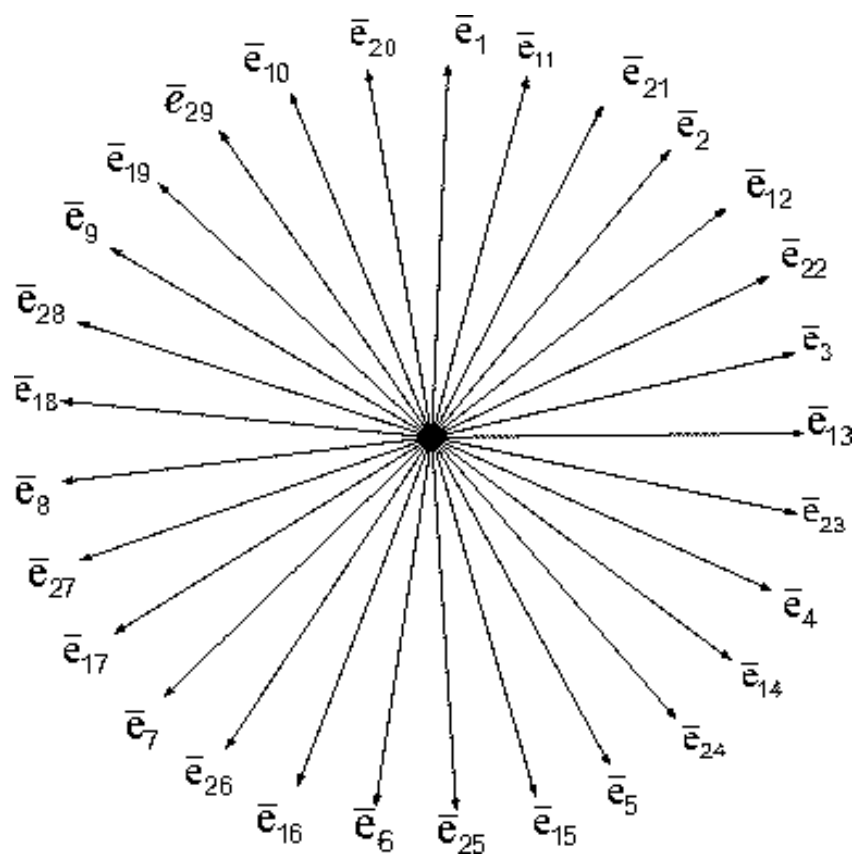


Рис.1. 52. Звезда эдс секций.

На основании звезды эдс секций и развернутой схемы строится векторная диаграмма обмотки, которая приведена на рис. 1. 53.

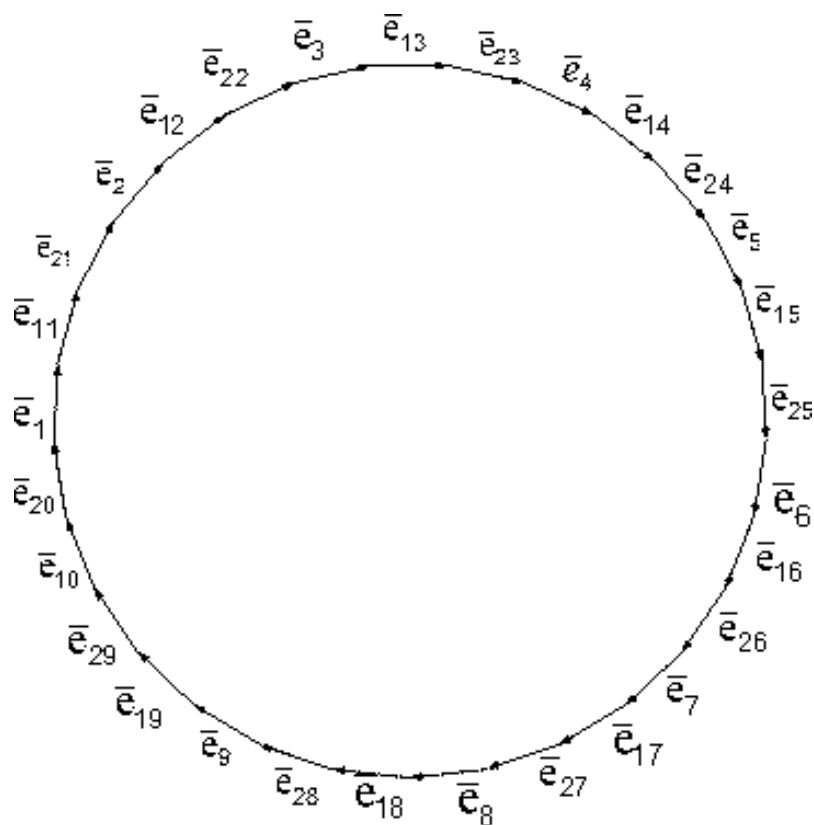


Рис. 1. 53. Векторная диаграмма обмотки.

1. 6. 2. Пример простой волновой четырехполюсной обмотки якоря
с числом элементарных пазов в реальной, равным трем.

Исходные данные:

- тип обмотки – простая волновая
- кратность обмотки – $m = 1$
- число реальных пазов – $Z = 11$
- число элементарных пазов в реальном – $U_Z = 3$
- число полюсов – $2p = 4$
- коэффициент магнитного перекрытия – $\alpha = 0,65$

Выполнить:

- 1) рассчитать обмотку (определить шаги y_1, y_2, y, y_k полюсное деление τ , ширину полюса bn , число коллекторных пластин K , число секций S , угол сдвига эдс соседних пазов γ);
- 2) выполнить развернутую схему обмотки, расставить полюса, щетки на коллекторе;
- 3) выполнить схему параллельных ветвей обмотки;
- 4) построить звезду пазовых эдс;
- 5) построить звезду эдс секций и векторную диаграмму обмотки.

Расчет обмотки проводится в следующем порядке:

- 1) число элементарных пазов $Z_3 = Z \times U_Z = 11 \times 3 = 33$
- 2) число секций обмотки $S = Z_3 = 33$
- 3) число коллекторных пластин коллектора $K = S = Z_3 = 33$
- 4) полюсное деление якоря:

$$\tau = \frac{Z_3}{2p} = \frac{33}{4} = 8,25$$

- 5) первый частичный шаг обмотки по якорю:

$$y_1 = \frac{Z_3}{2p} \pm \varepsilon = 8,25 - 0,25 = 8$$

- 6) результирующий шаг обмотки:

$$y = y_n = \frac{K \pm m}{p} = \frac{33 - 1}{2} = 16$$

- 7) второй частичный шаг обмотки по якорю:

$$y_2 = y - y_1 = 16 - 8 = 8$$

- 8) ширина полюсной дуги:

$$bn = \tau \times \alpha = 8,25 \times 0,65 = 5,4$$

- 9) угол сдвига эдс соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{11} = 65,45^\circ$$

По расчетным данным строится развернутая схема обмотки (рис. 1. 54).

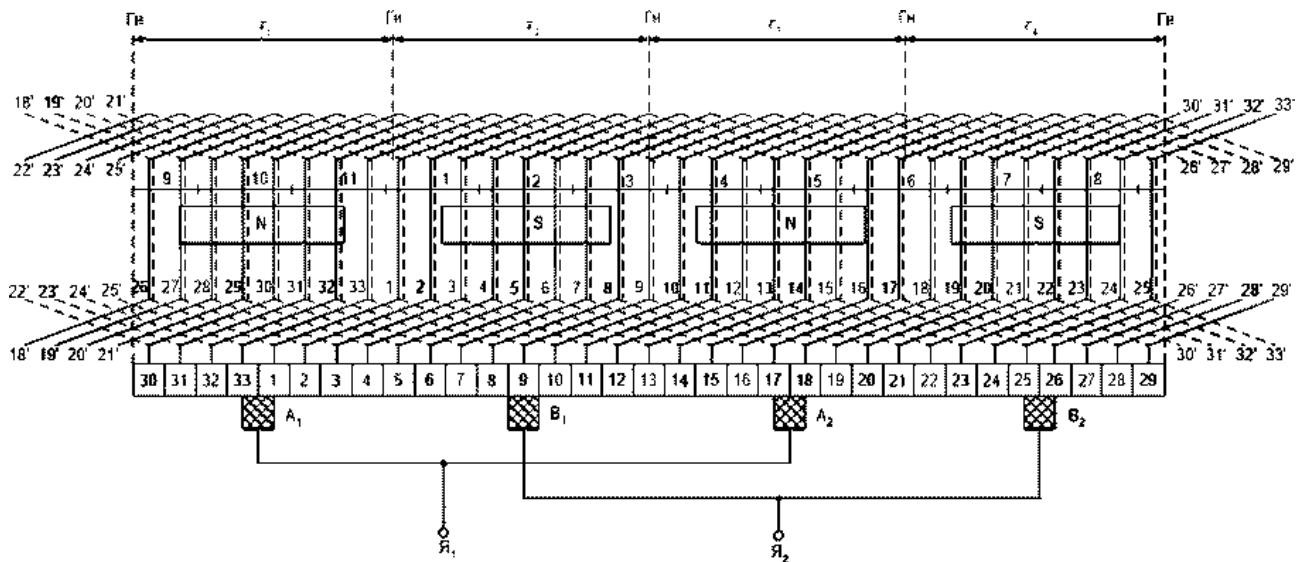


Рис. 1. 54. Развернутая схема простой волновой обмотки якоря:
 $Z = 11, Z_3 = 33, U_Z = 3, y_1 = 8, y_2 = 8, y = y_k = 16, b_n = 5,4$.

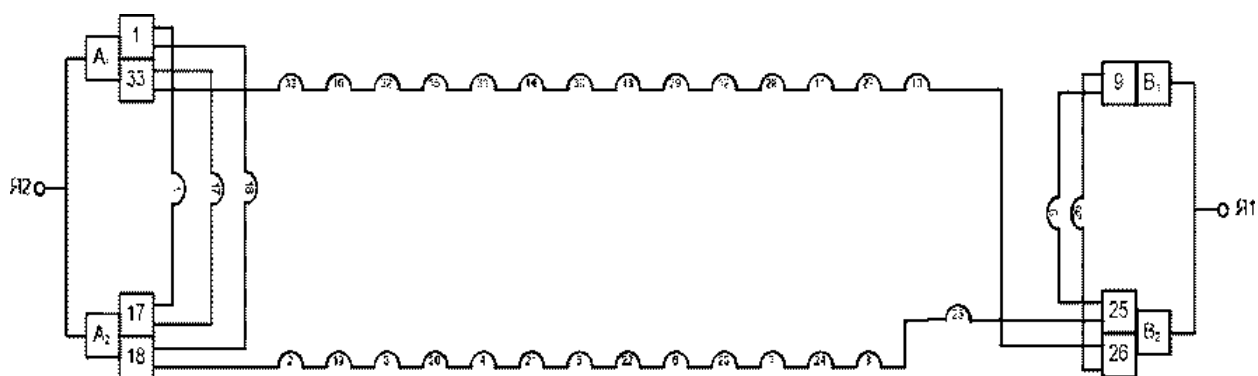


Рис. 1. 55. Схема параллельных ветвей обмотки,
 развернутая схема которой показана на рис. 1. 54.

По расчетному значению угла сдвига $\varepsilon_{дс}$ двух соседних пазов строится звезда пазовых $\varepsilon_{дс}$ (рис. 1. 56).

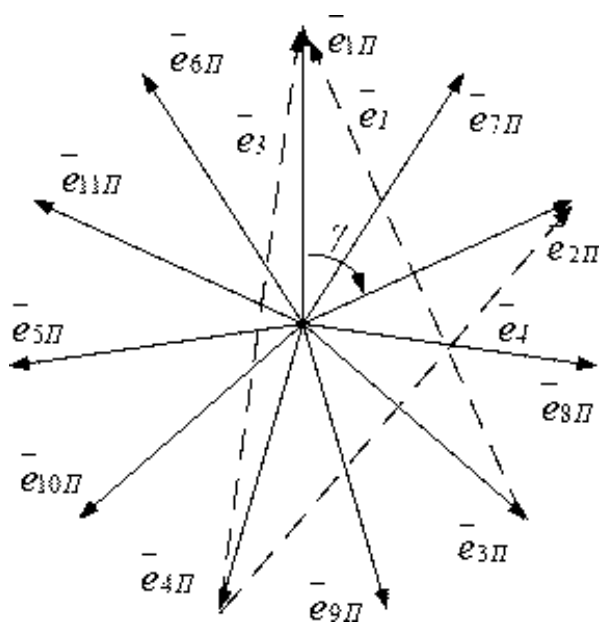


Рис. 1. 56. Звезда пазовых $\varepsilon_{дс}$ якоря.

Звезда пазовых $\bar{e}ds$ и схема обмотки дает возможность построить звезду $\bar{e}ds$ секций. Согласно развернутой схеме обмотки имеем:

$$\begin{aligned}
 \bar{e}_1 &= \bar{e}_{1п} - \bar{e}_{3п} & \bar{e}_{11} &= \bar{e}_{12} = \bar{e}_{4п} - \bar{e}_{7п} & \bar{e}_{22} &= \bar{e}_{8п} - \bar{e}_{10п} \\
 \bar{e}_2 &= \bar{e}_3 = \bar{e}_{1п} - \bar{e}_{4п} & \bar{e}_{13} &= \bar{e}_{5п} - \bar{e}_{7п} & \bar{e}_{23} &= \bar{e}_{24} = \bar{e}_{8п} - \bar{e}_{11п} \\
 \bar{e}_4 &= \bar{e}_{2п} - \bar{e}_{4п} & \bar{e}_{14} &= \bar{e}_{15} = \bar{e}_{5п} - \bar{e}_{8п} & \bar{e}_{25} &= \bar{e}_{9п} - \bar{e}_{11п} \\
 \bar{e}_5 &= \bar{e}_6 = \bar{e}_{2п} - \bar{e}_{5п} & \bar{e}_{16} &= \bar{e}_{6п} - \bar{e}_{8п} & \bar{e}_{26} &= \bar{e}_{27} = \bar{e}_{9п} - \bar{e}_{1п} \\
 \bar{e}_7 &= \bar{e}_{3п} - \bar{e}_{5п} & \bar{e}_{17} &= \bar{e}_{18} = \bar{e}_{6п} - \bar{e}_{9п} & \bar{e}_{28} &= \bar{e}_{10п} - \bar{e}_{1п} \\
 \bar{e}_8 &= \bar{e}_9 = \bar{e}_{3п} - \bar{e}_{6п} & \bar{e}_{19} &= \bar{e}_{7п} - \bar{e}_{9п} & \bar{e}_{29} &= \bar{e}_{30} = \bar{e}_{10п} - \bar{e}_{2п} \\
 \bar{e}_{10} &= \bar{e}_{4п} - \bar{e}_{6п} & \bar{e}_{20} &= \bar{e}_{21} = \bar{e}_{7п} - \bar{e}_{10п} & \bar{e}_{31} &= \bar{e}_{11п} - \bar{e}_{2п} \\
 & & & & \bar{e}_{32} &= \bar{e}_{33} = \bar{e}_{11п} - \bar{e}_{3п} .
 \end{aligned}$$

Векторная диаграмма обмотки, представленная на рис. 1. 58, построена на основании звезды $\bar{e}ds$ секций (рис. 1. 57) и развернутой схемы обмотки (рис. 1. 54) или схемы параллельных ветвей (рис. 1. 55).

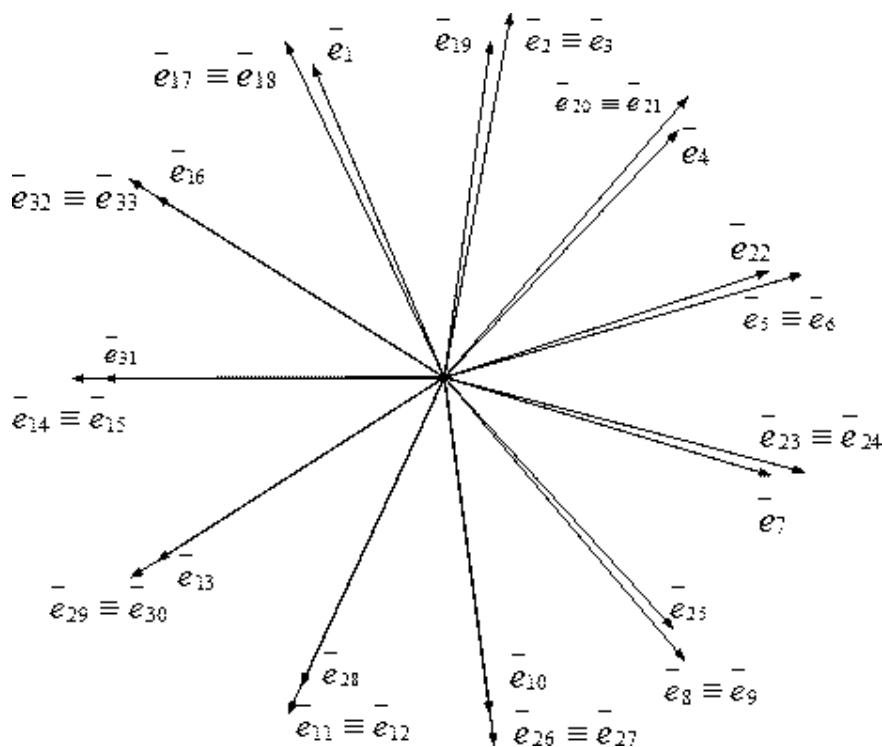


Рис. 1. 57. Звезда $\bar{e}ds$ секций.

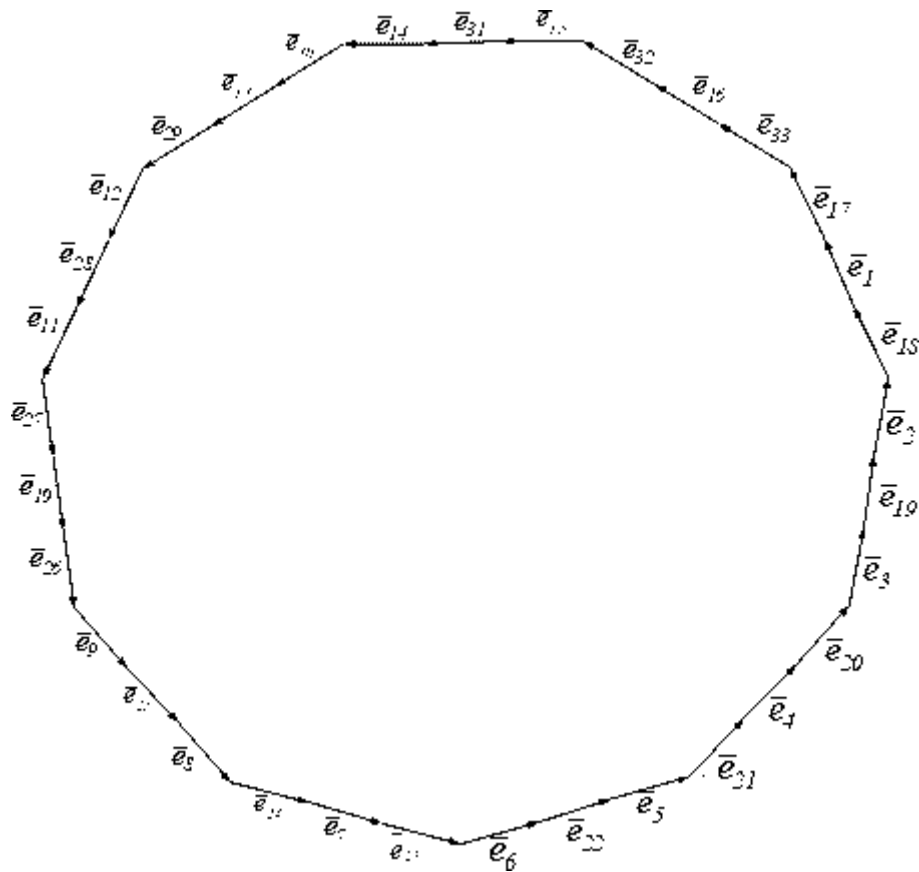


Рис. 1. 58. Векторная диаграмма обмотки.

1. 7. Сложные волновые обмотки.

Сложная волновая обмотка представляет собой совокупность нескольких простых волновых обмоток, аналогично, как и сложных петлевых обмоток.

Методика их расчета практически такая же, как и простых волновых обмоток. Отличие состоит только в расчете шага по коллектору и результирующего шага по якорю.

Эти шаги рассчитываются по выражению:

$$y_k = y = \frac{K \pm m}{p} - \text{целое число}$$

где m – кратность обмотки, т. е. число простых волновых обмоток в сложной. Обычно m принимается равным двум ($m = 2$).

Примеры расчета сложных волновых, выполнение развернутых схем, схем параллельных ветвей, звезд пазовых эдс и эдс секции, а также векторных диаграмм эдс приводятся ниже.

1. 7. 1. Пример сложной волновой четырехполюсной обмотки якоря с числом элементарных пазов в реальном, равным двум.

Исходные данные:

- тип обмотки – сложная волновая
- кратность обмотки – $m = 2$
- число реальных пазов – $Z = 9$
- число элементарных пазов в реальном – $U_Z = 2$
- число полюсов – $2p = 4$
- коэффициент магнитного перекрытия – $\alpha = 0,7$

Выполнить:

- 1) рассчитать обмотку (определить шаги y_1, y_2, y, y_k полюсное деление τ , ширину полюса bn , число коллекторных пластин K , число секций S , угол сдвига эдс соседних пазов γ);
- 2) выполнить развернутую схему обмотки, расставить полюса, щетки на коллекторе;
- 3) выполнить схему параллельных ветвей обмотки;
- 4) построить звезду пазовых эдс;
- 5) построить звезду эдс секций и векторную диаграмму обмотки.

Расчет обмотки проводится в следующем порядке:

- 1) число элементарных пазов:

$$Z_{\text{э}} = Z \times U_z = 9 \times 2 = 18$$

- 2) число секций обмотки:

$$S = Z_{\text{э}} = 18$$

- 3) число коллекторных пластин коллектора:

$$K = S = Z_{\text{э}} = 18$$

- 4) полюсное деление якоря:

$$\tau = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} = \frac{18}{4} = 4,5$$

- 5) первый частичный шаг обмотки по якорю:

$$y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} \pm \varepsilon = 5$$

- 6) результирующий шаг обмотки:

$$y = y_k = \frac{K \pm m}{p} = \frac{18 + 2}{2} = 10$$

- 7) второй частичный шаг обмотки по якорю:

$$y_2 = y - y_1 = 10 - 5 = 5$$

- 8) ширина полюсной дуги:

$$bn = \tau \times \alpha = 4,5 \times 0,7 = 3,15$$

- 9) угол сдвига эдс соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{9} = 80^\circ$$

По расчетным данным выполняется развернутая схема обмотки якоря (рис. 1. 59). На схеме пронумерованы элементарные пазы, реальные пазы и коллекторные пластины, расставлены полюса и соответственно щетки на коллекторе.

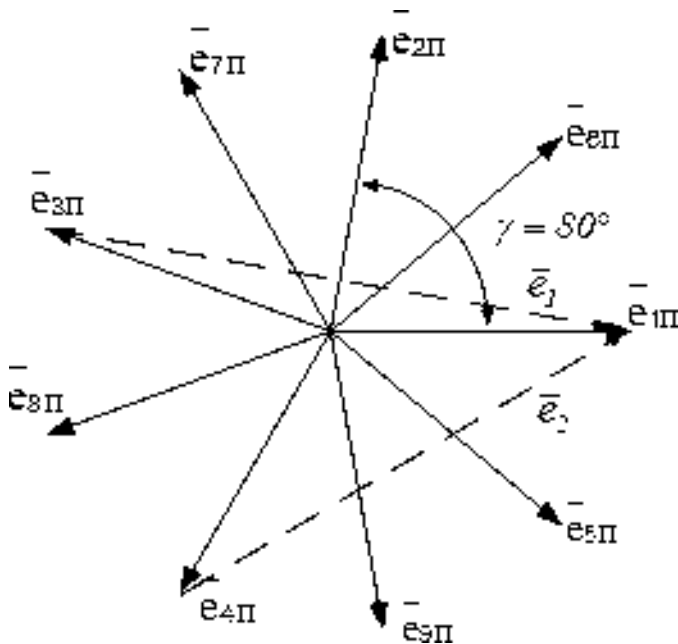


Рис 1. 61. Звезда пазовых эдс.

Звезда эдс секций строится на основании звезды пазовых эдс и развернутой схемы обмотки.

$$\bar{e}_1 = \bar{e}_{1п} - \bar{e}_{3п}$$

$$\bar{e}_2 = \bar{e}_{1п} - \bar{e}_{4п}$$

$$\bar{e}_3 = \bar{e}_{2п} - \bar{e}_{4п}$$

$$\bar{e}_4 = \bar{e}_{2п} - \bar{e}_{5п}$$

$$\bar{e}_5 = \bar{e}_{3п} - \bar{e}_{5п}$$

$$\bar{e}_6 = \bar{e}_{3п} - \bar{e}_{6п}$$

$$\bar{e}_7 = \bar{e}_{4п} - \bar{e}_{6п}$$

$$\bar{e}_8 = \bar{e}_{4п} - \bar{e}_{7п}$$

$$\bar{e}_9 = \bar{e}_{5п} - \bar{e}_{7п}$$

$$\bar{e}_{10} = \bar{e}_{5п} - \bar{e}_{8п}$$

$$\bar{e}_{11} = \bar{e}_{6п} - \bar{e}_{8п}$$

$$\bar{e}_{12} = \bar{e}_{6п} - \bar{e}_{9п}$$

$$\bar{e}_{13} = \bar{e}_{7п} - \bar{e}_{9п}$$

$$\bar{e}_{14} = \bar{e}_{7п} - \bar{e}_{1п}$$

$$\bar{e}_{15} = \bar{e}_{8п} - \bar{e}_{1п}$$

$$\bar{e}_{16} = \bar{e}_{8п} - \bar{e}_{2п}$$

$$\bar{e}_{17} = \bar{e}_{9п} - \bar{e}_{2п}$$

$$\bar{e}_{18} = \bar{e}_{9п} - \bar{e}_{3п}$$

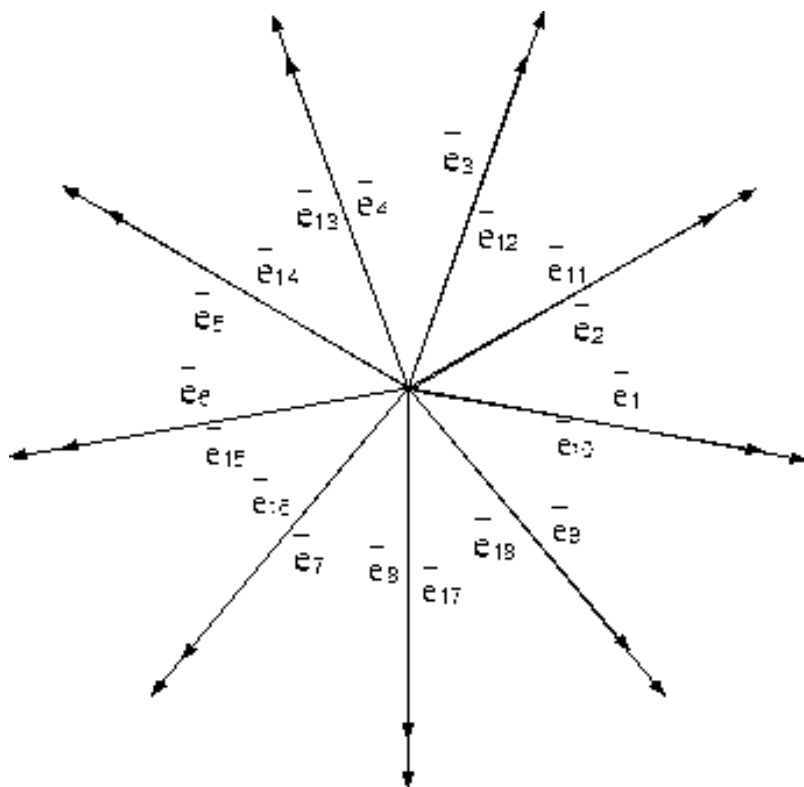


Рис. 1. 62. Звезда эдс секций.

На основании звезды эдс секций и развернутой схемы обмотки, приведенной на рис. 1. 59. или схемы параллельных ветвей, представленной на рис. 1. 60 строится векторная диаграмма эдс обмотки (рис. 1. 63).

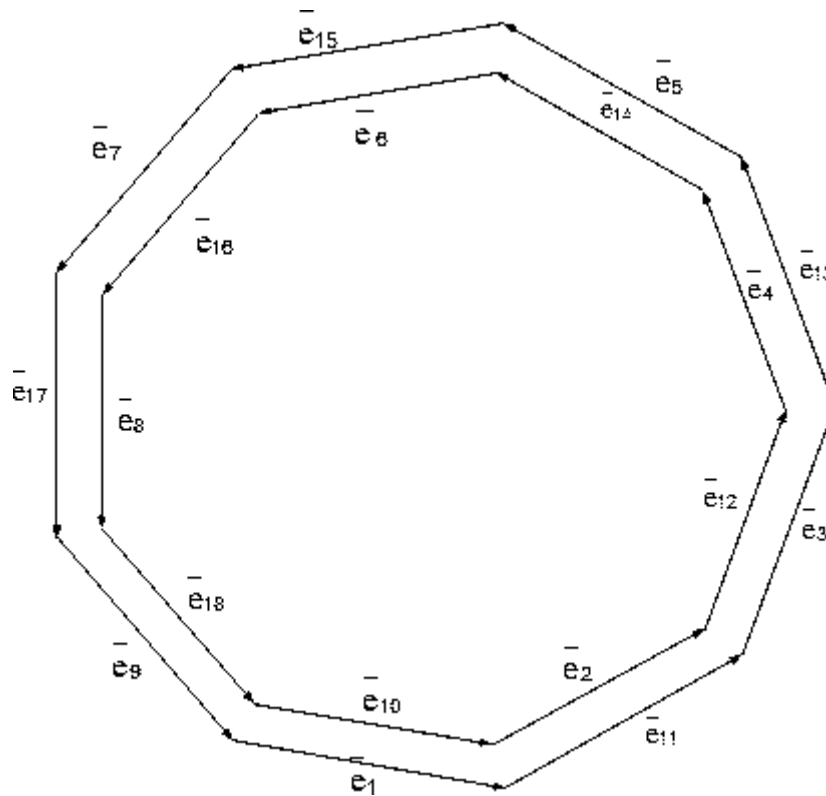


Рис. 1. 63. Векторная диаграмма обмотки.

1. 7. 2. Пример сложной волновой четырехполюсной обмотки якоря с числом элементарных пазов в реальной, равным трем.

Исходные данные:

- тип обмотки – сложная волновая
- кратность обмотки – $m = 2$
- число реальных пазов – $Z = 14$
- число элементарных пазов в реальном – $U_Z = 3$
- число полюсов – $2p = 4$
- коэффициент магнитного перекрытия – $\alpha = 0,7$

Выполнить:

- 1) рассчитать обмотку (определить шаги y_1, y_2, y, y_k полюсное деление τ , ширину полюса b_p , число коллекторных пластин K , число секций S , угол сдвига эдс соседних пазов γ);
- 2) выполнить развернутую схему обмотки, расставить полюса, щетки на коллекторе;
- 3) выполнить схему параллельных ветвей обмотки;
- 4) построить звезду пазовых эдс;
- 5) построить звезду эдс секций и векторную диаграмму обмотки.

Расчет обмотки проводится в следующем порядке

- 1) число элементарных пазов: $Z_3 = Z \times U_Z = 14 \times 3 = 42$
- 2) число секций обмотки: $S = Z_3 = 42$
- 3) число коллекторных пластин коллектора: $K = S = Z_3 = 42$
- 4) полюсное деление якоря:

$$\tau = \frac{Z_3}{2p} = \frac{42}{4} = 10,5$$

- 5) первый частичный шаг обмотки по якорю:

$$y_1 = \frac{Z_3}{2p} \pm \varepsilon = 10,5 - 0,5 = 10$$

6) результирующий шаг обмотки:

$$y = y_k = \frac{K \pm m}{p} = \frac{42 - 2}{2} = 20$$

7) второй частичный шаг обмотки по якорю:

$$y_2 = y - y_1 = 20 - 10 = 10$$

8) ширина полюсной дуги:

$$bn = \tau \times \alpha = 10,5 \times 0,7 = 7,35$$

9) угол сдвига эдс соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{14} = 51^\circ$$

На основании выполненных расчетов строится развернутая схема обмотки (рис. 1. 65).

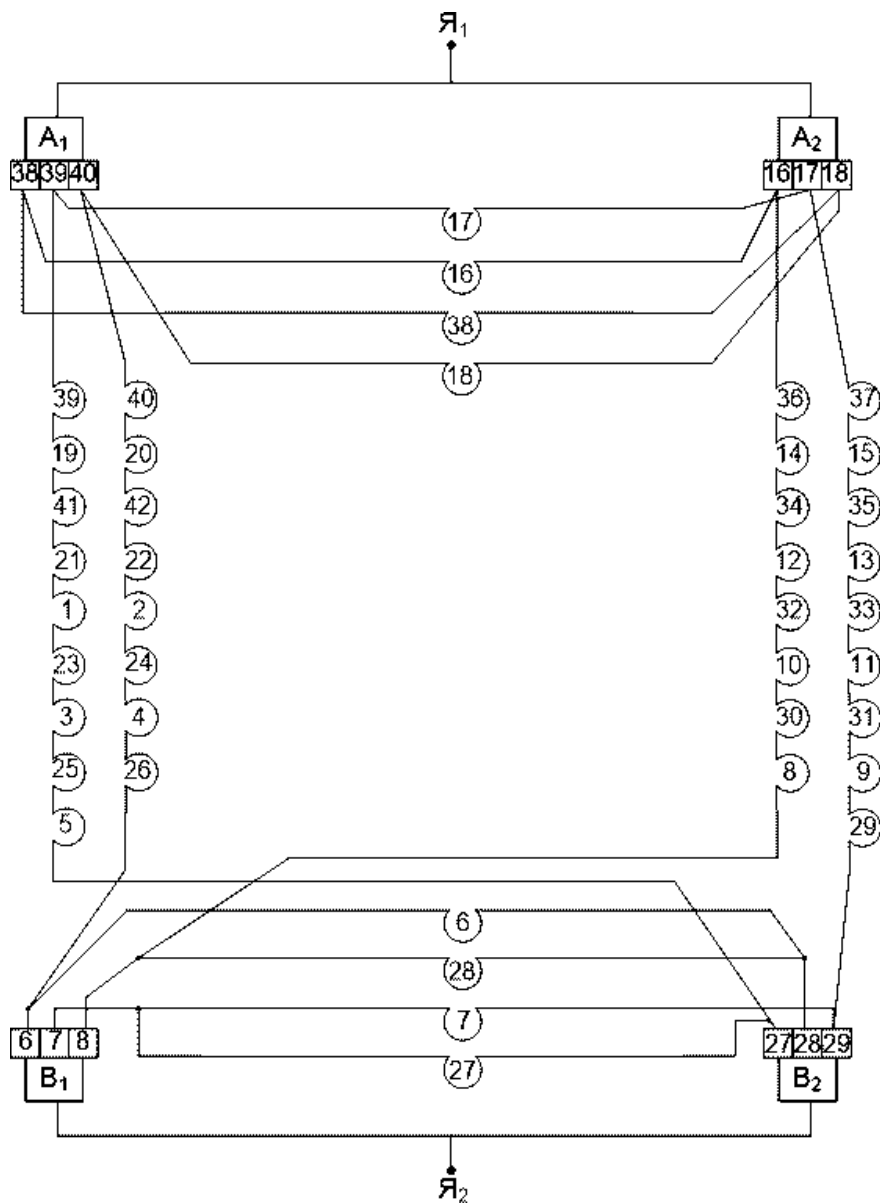


Рис. 1. 64. Схема параллельных ветвей обмотки.

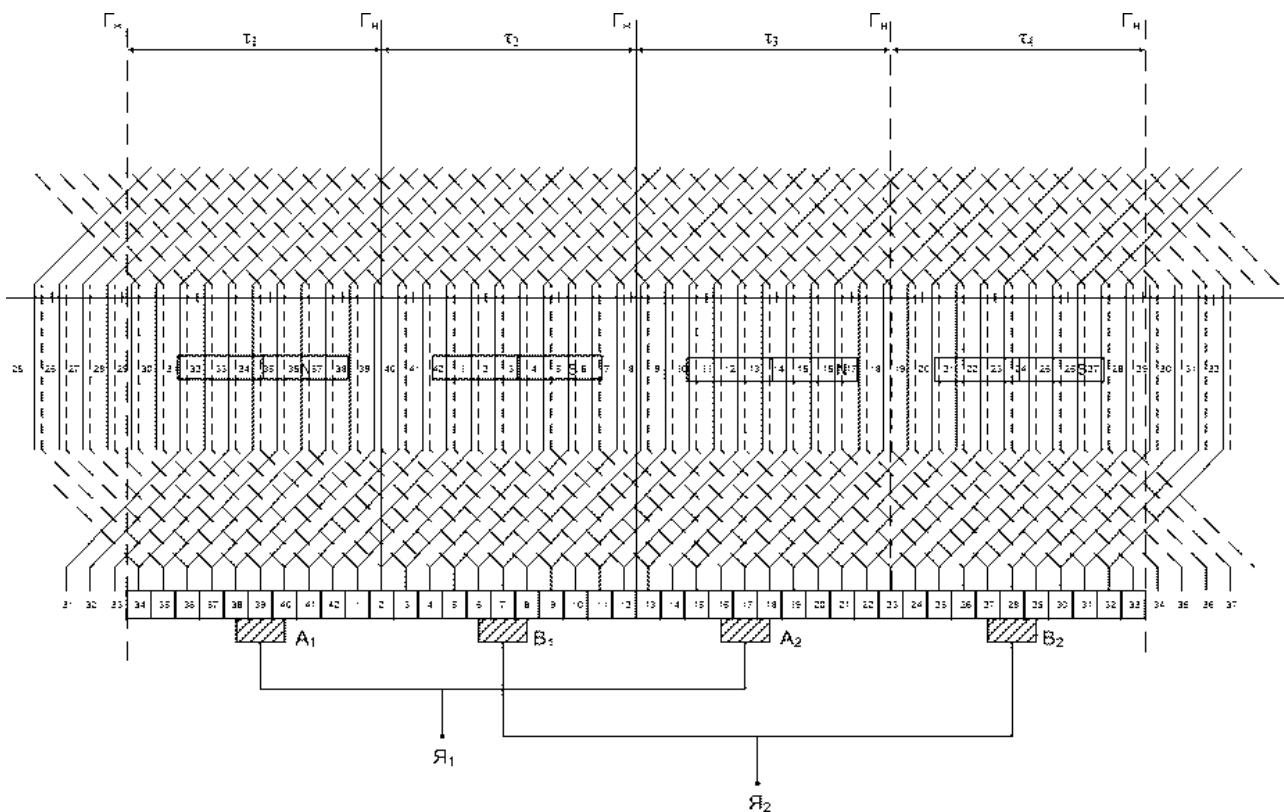


Рис. 1. 65. Развернутая схема сложной волновой обмотки якоря
 $2p = 4, Z = 14, Z_3 = 42, U_z = 3, y_1 = 10, y_2 = 10, y = y_k = 20, K = 42, S = 42, \tau = 40,5$

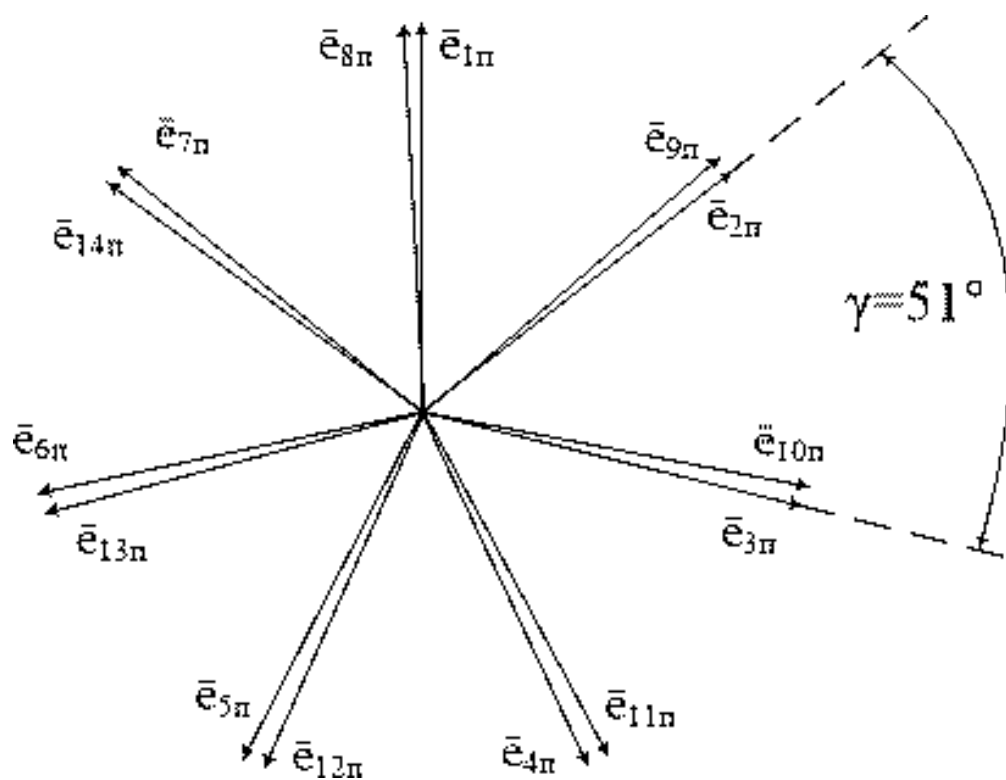


Рис 1. 66. Звезда пазовых эдс.

Звезда *эдс* секций (рис. 1. 68) строится на основании звезды пазовых *эдс* (рис. 1. 66) и развернутой схемы обмотки (рис. 1. 65).

$\bar{e}_1 = \bar{e}_{1п} - \bar{e}_{5п}$	$\bar{e}_{15} = \bar{e}_{6п} - \bar{e}_{9п}$	$\bar{e}_{29} = \bar{e}_{11п} - \bar{e}_{14п}$
$\bar{e}_2 = \bar{e}_{2п} - \bar{e}_{5п}$	$\bar{e}_{16} = \bar{e}_{6п} - \bar{e}_{10п}$	$\bar{e}_{30} = \bar{e}_{11п} - \bar{e}_{14п}$
$\bar{e}_3 = \bar{e}_{2п} - \bar{e}_{5п}$	$\bar{e}_{17} = \bar{e}_{7п} - \bar{e}_{10п}$	$\bar{e}_{31} = \bar{e}_{11п} - \bar{e}_{1п}$
$\bar{e}_4 = \bar{e}_{2п} - \bar{e}_{6п}$	$\bar{e}_{18} = \bar{e}_{7п} - \bar{e}_{10п}$	$\bar{e}_{32} = \bar{e}_{12п} - \bar{e}_{1п}$
$\bar{e}_5 = \bar{e}_{3п} - \bar{e}_{6п}$	$\bar{e}_{19} = \bar{e}_{7п} - \bar{e}_{11п}$	$\bar{e}_{33} = \bar{e}_{12п} - \bar{e}_{1п}$
$\bar{e}_6 = \bar{e}_{3п} - \bar{e}_{6п}$	$\bar{e}_{20} = \bar{e}_{8п} - \bar{e}_{11п}$	$\bar{e}_{34} = \bar{e}_{12п} - \bar{e}_{2п}$
$\bar{e}_7 = \bar{e}_{3п} - \bar{e}_{7п}$	$\bar{e}_{21} = \bar{e}_{8п} - \bar{e}_{11п}$	$\bar{e}_{35} = \bar{e}_{13п} - \bar{e}_{2п}$
$\bar{e}_8 = \bar{e}_{4п} - \bar{e}_{7п}$	$\bar{e}_{22} = \bar{e}_{8п} - \bar{e}_{12п}$	$\bar{e}_{36} = \bar{e}_{13п} - \bar{e}_{2п}$
$\bar{e}_9 = \bar{e}_{4п} - \bar{e}_{7п}$	$\bar{e}_{23} = \bar{e}_{9п} - \bar{e}_{12п}$	$\bar{e}_{37} = \bar{e}_{13п} - \bar{e}_{3п}$
$\bar{e}_{10} = \bar{e}_{4п} - \bar{e}_{8п}$	$\bar{e}_{24} = \bar{e}_{9п} - \bar{e}_{12п}$	$\bar{e}_{38} = \bar{e}_{14п} - \bar{e}_{3п}$
$\bar{e}_{11} = \bar{e}_{5п} - \bar{e}_{8п}$	$\bar{e}_{25} = \bar{e}_{9п} - \bar{e}_{13п}$	$\bar{e}_{39} = \bar{e}_{14п} - \bar{e}_{3п}$
$\bar{e}_{12} = \bar{e}_{5п} - \bar{e}_{8п}$	$\bar{e}_{26} = \bar{e}_{10п} - \bar{e}_{13п}$	$\bar{e}_{40} = \bar{e}_{14п} - \bar{e}_{4п}$
$\bar{e}_{13} = \bar{e}_{5п} - \bar{e}_{9п}$	$\bar{e}_{27} = \bar{e}_{10п} - \bar{e}_{13п}$	$\bar{e}_{41} = \bar{e}_{1п} - \bar{e}_{4п}$
$\bar{e}_{14} = \bar{e}_{6п} - \bar{e}_{9п}$	$\bar{e}_{28} = \bar{e}_{10п} - \bar{e}_{14п}$	$\bar{e}_{42} = \bar{e}_{1п} - \bar{e}_{4п}$

Для пояснения методики построения векторов *эдс* секций на рис. 1. 67 показано построение *эдс* секции 1 и *эдс* секции 4. На основании звезды *эдс* секций (рис. 1. 67) и схемы параллельных ветвей (рис. 1. 65) строится векторная диаграмма обмотки (рис. 1. 69).

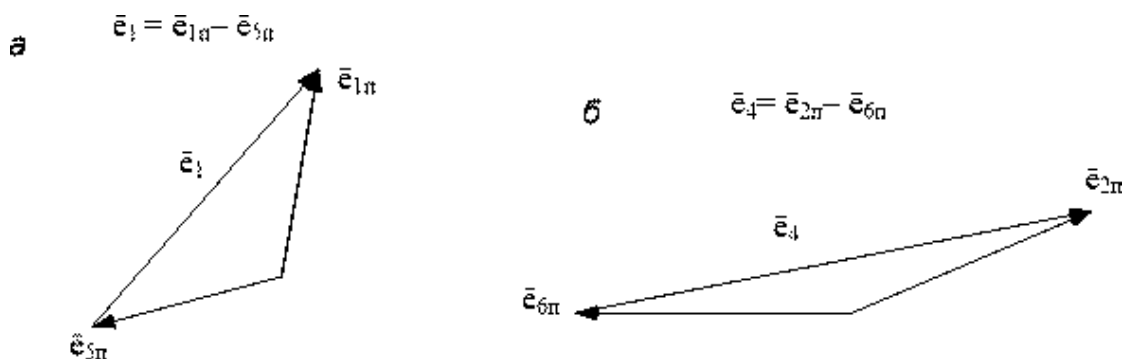


Рис. 1. 67. Методика построения векторов *эдс* 1-й и 4-й секций обмотки.

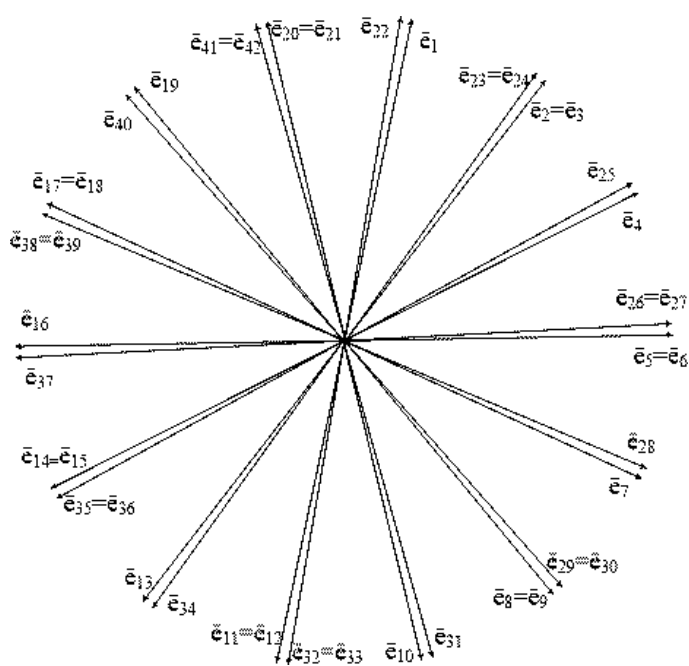


Рис. 1. 68. Звезда *эдс* секций обмотки.

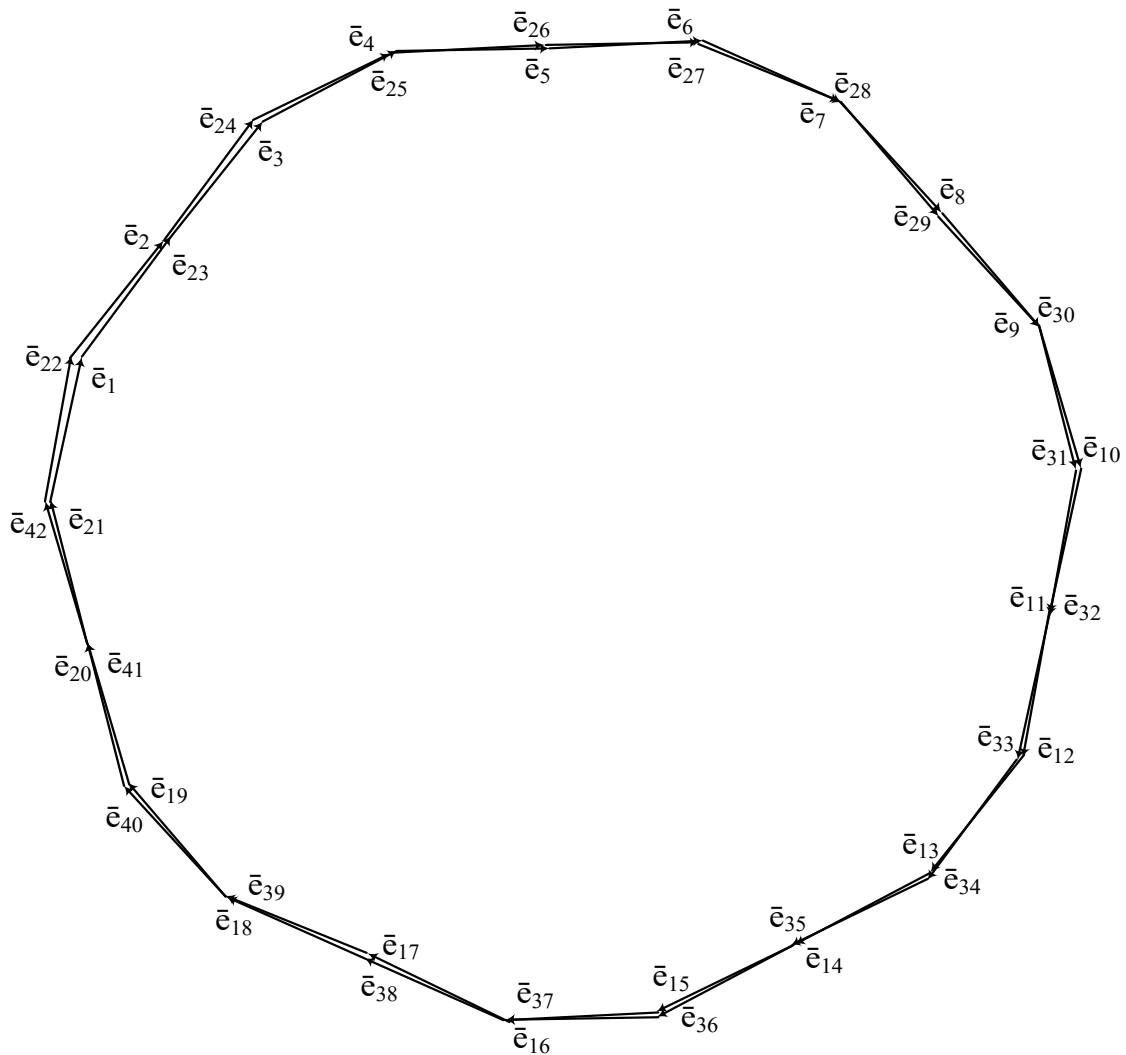


Рис. 1. 69. Векторная диаграмма обмотки.

1. 7. 3. Пример сложной волновой восьмиполюсной обмотки якоря с числом элементарных пазов в реальной, равным трем.

Исходные данные:

- тип обмотки – сложная волновая
- кратность обмотки – $m = 2$
- число реальных пазов – $Z = 14$
- число элементарных пазов в реальном – $U_Z = 3$
- число полюсов – $2p = 8$
- коэффициент магнитного перекрытия – $\alpha = 0,65$

Выполнить:

- 1) рассчитать обмотку (определить шаги y_1, y_2, y, y_k полюсное деление τ , ширину полюса b_p , число коллекторных пластин K , число секций S , угол сдвига эдс соседних пазов γ);
- 2) выполнить развернутую схему обмотки, расставить полюса, щетки на коллекторе;
- 3) выполнить схему параллельных ветвей обмотки;
- 4) построить звезду пазовых эдс;
- 5) построить звезду эдс секций и векторную диаграмму обмотки.

Расчет обмотки проводится в следующем порядке:

- 1) число элементарных пазов:

$$Z_3 = Z \times U_Z = 14 \times 3 = 42$$

- 2) число секций обмотки $S = Z_3 = 42$

- 3) число коллекторных пластин коллектора $K = S = Z_3 = 42$

4) полюсное деление якоря:

$$\tau = \frac{Z_{\Sigma}}{2p} = \frac{42}{8} = 5,25$$

5) первый частичный шаг обмотки по якорю:

$$y_1 = \frac{Z_{\Sigma}}{2p} \pm \varepsilon = 5,25 - 0,25 = 5$$

6) результирующий шаг обмотки:

$$y = y_k = \frac{K \pm m}{p} = \frac{42 - 2}{4} = 10$$

7) второй частичный шаг обмотки по якорю:

$$y_2 = y - y_1 = 10 - 5 = 5$$

8) ширина полюсной дуги:

$$bn = \tau \times \alpha = 5,25 \times 0,65 = 3,41$$

9) угол сдвига эдс соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{4 \times 360^\circ}{14} = 102,86^\circ$$

По расчетным данным строится развернутая схема обмотки. Она показана на рис. 1. 70.

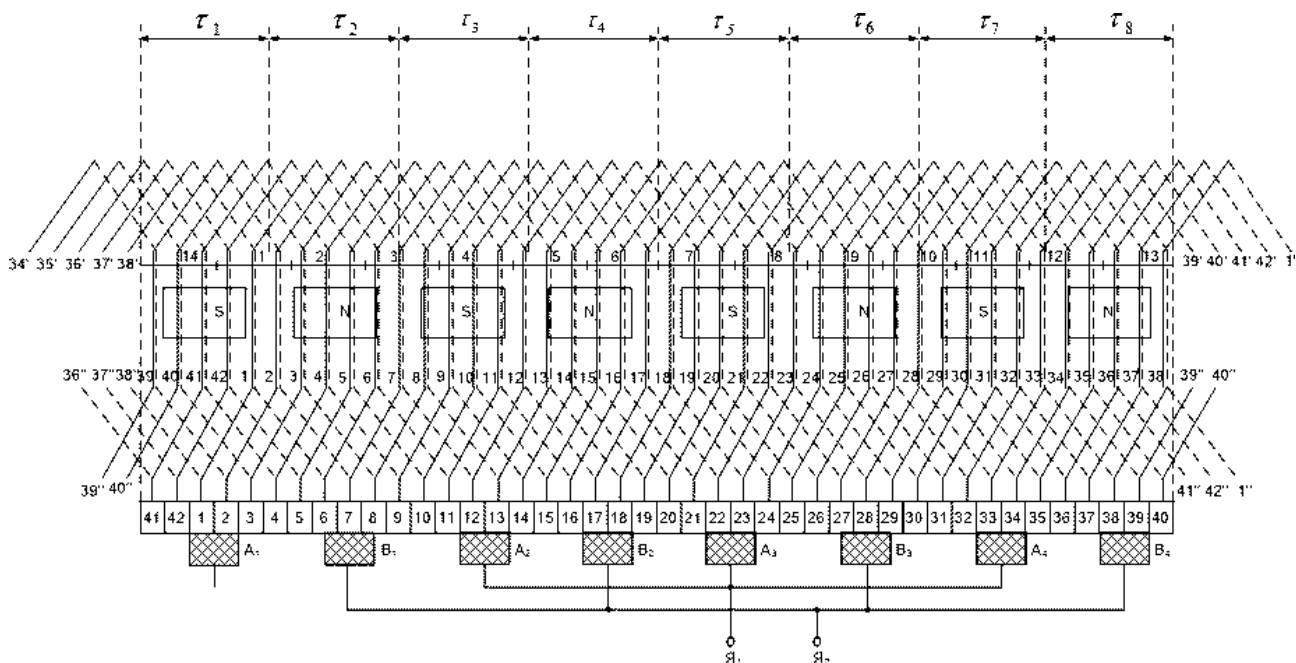


Рис. 1. 70. Развернутая схема сложной волновой обмотки якоря:

$Z = 14, U_Z = 3, Z_{\Sigma} = 4, \tau = 5,25, y_1 = 5, y_2 = 5, y = y_k = 10, bn = 3,41.$

По развернутой схеме обмотки строится схема параллельных ветвей (рис. 1. 71).

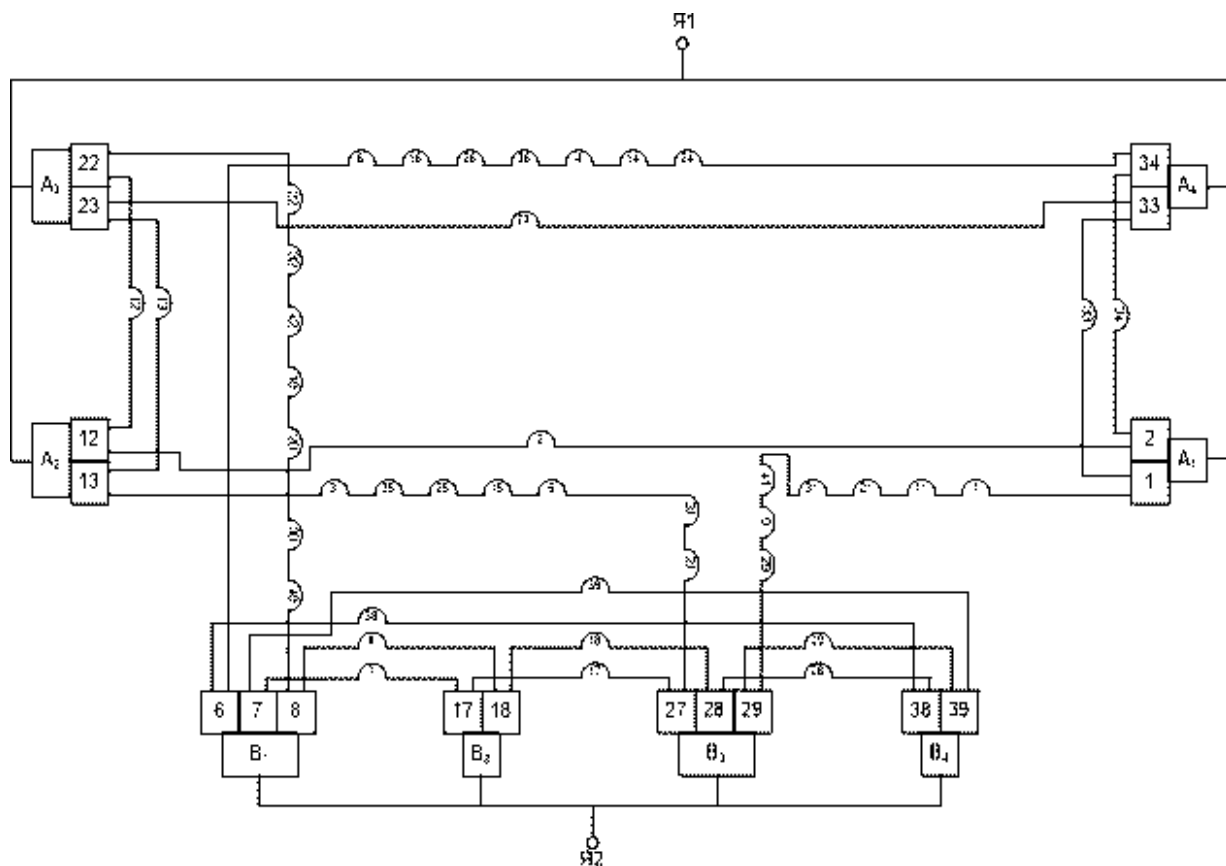


Рис. 1. 71. Схема параллельных ветвей обмотки.

По расчетному углу сдвига эдс соседних реальных пазов γ строится звезда пазовых эдс обмотки якоря (рис. 1. 72).

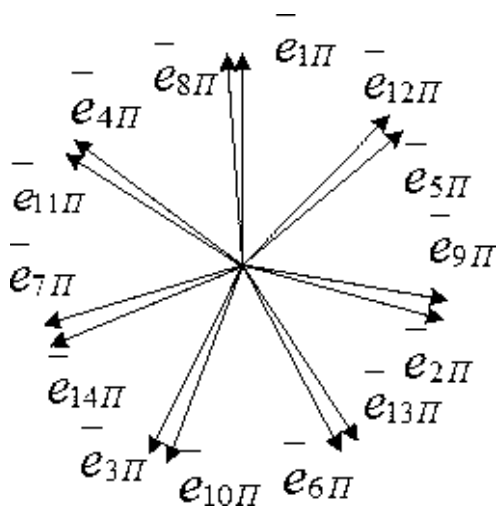


Рис 1. 72. Звезда пазовых эдс .

Звезда пазовых эдс и развернутая схема обмотки якоря позволяют построить звезду эдс секций. Эдс секций определяются как векторная разность соответствующих пазовых эдс пазов, в которых расположена соответствующая секция. Например,

$$\bar{e}_1 = \bar{e}_2 = \bar{e}_{1П} - \bar{e}_{3П}, \quad \bar{e}_3 = \bar{e}_{1П} - \bar{e}_{4П}, \quad \bar{e}_4 = \bar{e}_5 = \bar{e}_{2П} - \bar{e}_{4П}, \quad \bar{e}_6 = \bar{e}_{2П} - \bar{e}_{5П}, \quad \bar{e}_7 = \bar{e}_8 = \bar{e}_{3П} - \bar{e}_{5П} \quad \bar{e}_1$$

и т. д. Звезда эдс секций показана на рис. 1. 73.

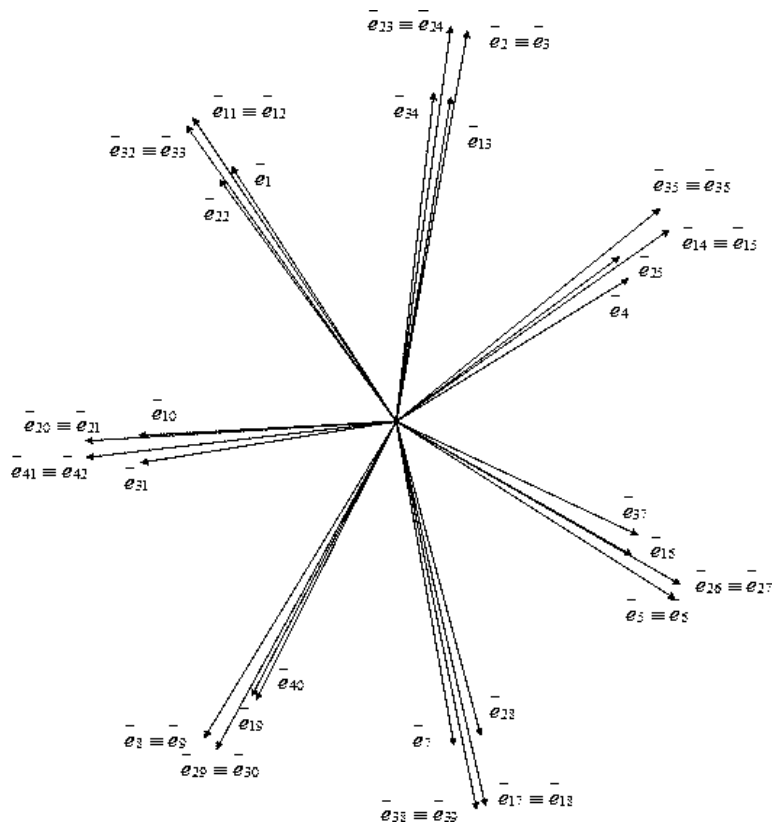


Рис. 1. 73. Звезда эдс секций обмотки.

По развернутой схеме обмотки или схеме параллельных ветвей и звезде эдс секций строится векторная диаграмма обмотки. Векторная диаграмма обмотки якоря приведена на рис. 1.74.

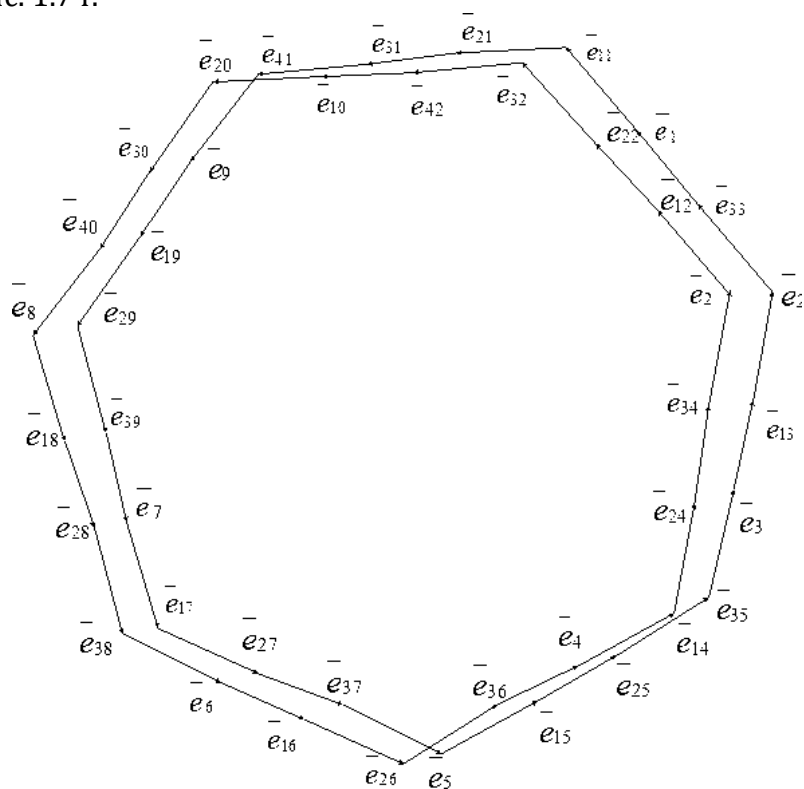


Рис. 1. 74. Векторная диаграмма обмотки.

Из приведенных примеров сложных волновых обмоток видно, что число параллельных ветвей в этих обмотках $a = 2 \times m$.

1. 8. Комбинированная обмотка якоря.

Комбинированная обмотка якоря машин постоянного тока является сложной и представляет совокупность простой петлевой и простой волновой обмоток. Часто эту обмотку называют "лягушачьей" по конфигурации якорных катушек (секций). Схема соединения секции комбинированной обмотки и форма секций приведены на рис. 1. 75.

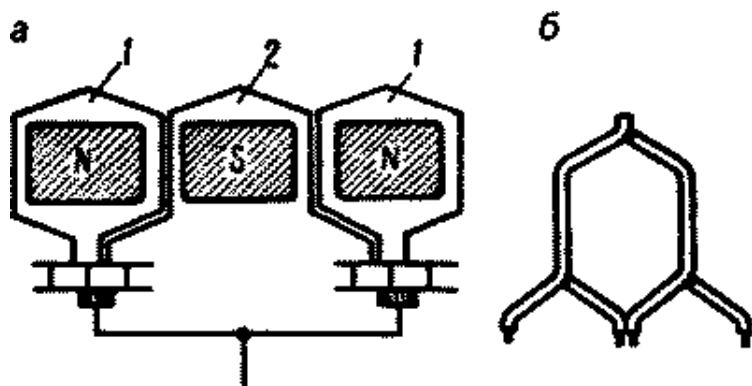


Рис. 1. 75. Схема соединения секций "лягушачьей" обмотки (а) и форма ее якорной катушки (б).

В связи с тем, что простые петлевые и волновые обмотки являются двухслойными, то в пазу якоря располагается по четыре слоя обмотки. Каждая обмотка рассчитывается на половину общего тока якоря, и *эдс* отдельных обмоток должны быть одинаковы. Таким образом, каждая обмотка рассчитывается на половину заданной мощности машины. Чтобы *эдс* ветвей различных простых обмоток были равны, должно быть равно общее количество витков в каждой обмотке. Вследствие того, что токи разных обмоток равны, должны быть одинакового сечения проводники обеих обмоток.

Контрольные вопросы

1. Типы обмоток якоря машин постоянного тока.
 2. Устройство секции петлевых и волновых обмоток.
 3. Шаги обмоток якоря петлевых и волновых обмоток
 4. Коллектор. Устройство и назначение.
 5. Щетки электрических машин постоянного тока. Щеткодержатели.
 6. Понятие о реальных и элементарных пазах якоря машин постоянного тока.
 7. Методика расчета простой петлевой обмотки.
 8. Методика расчета простой волновой обмотки.
 9. Условие симметрии обмоток якоря.
 10. Правила выполнения развернутых схем обмоток якоря.
 11. Расстановка полюсов и щеток на развернутой схеме обмотки.
 12. Схема параллельных ветвей обмоток якоря.
 13. Звезда пазовых *эдс* обмотки якоря. Правило ее построения.
 14. Звезда *эдс* секций обмотки якоря. Правило ее построения.
 15. Векторная диаграмма *эдс* обмотки якоря. Коэффициент пульсации *эдс*.
 16. Сложные петлевые обмотки и методика их расчета. Однократнозамкнутые и многократнозамкнутые обмотки.
 17. Сложные волновые обмотки якоря и методика их расчета.
 18. Комбинированные ("лягушачьи") обмотки якоря.
 19. Применение различных типов обмоток в машинах постоянного тока.
 20. Обмоточные провода. Марки, типы изоляции.
 21. Компоновка пазов якоря машин малой и большой мощности.
- Рекомендуемая литература: [1, 2, 5, 6, 16, 18, 20, 21].

2. Обмотки электрических машин переменного тока.

2. 1. Общие сведения об обмотках переменного тока.

Обмотки машин переменного тока применяются в основном как обмотки статора синхронных и асинхронных машин. Обычно синхронные машины применяются как генераторы, а асинхронные машины как двигатели. Обмотка статора является главным элементом электрической машины. Существуют конструкции синхронной машины с явно-выраженными и неявно-выраженными полюсами (рис. 2. 1). Они отличаются устройством роторов.

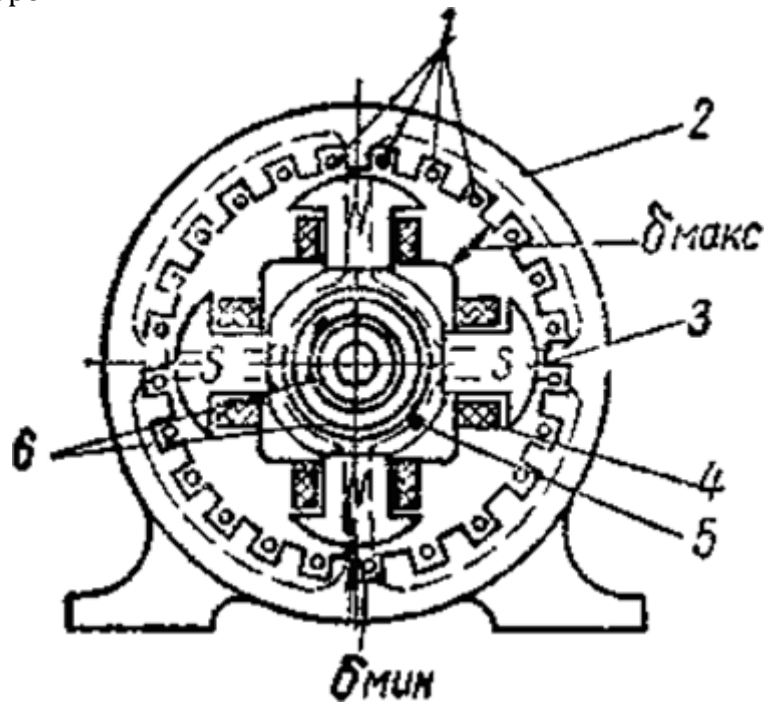


Рис. 2. 1. Конструктивная схема четырехполюсной синхронной машины:
1 – обмотка статора; 2 – статор; 3 – полюса; 4 – обмотка возбуждения;
5 – щетки; 6 – контактные кольца.

Устройство асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором наглядно поясняет рис. 2. 2. Асинхронный двигатель с фазным ротором в сборе с поперечным разрезом приведен на рис. 2. 3. Из приведенных рисунков видно, где находятся обмотки переменного тока в синхронных и асинхронных машинах.

Обмотки переменного тока подразделяются на однослойные и двухслойные. В большинстве машин переменного тока особенно средней и большой мощности применяются двухслойные обмотки. Однослойные обмотки используются в микромашинах и машинах малой мощности (до 7–10 кВт).

Основные достоинства двухслойных обмоток, которые объясняют широкое их применение следующие:

- одинаковые размеры и форма всех катушек, что упрощает и облегчает изготовление обмоток;
- возможность укорочения шага обмотки на любое число зубцовых делений, что применяется для подавления эдс высших гармоник и уменьшения расхода обмоточного провода;
- упрощенная форма лобовых частей катушек, что также упрощает изготовление обмотки.

По конструкции двухслойные обмотки переменного тока делятся на петлевые и волновые по аналогии с обмотками якоря машин постоянного тока. Причем обмотки петлевые и волновые в электромагнитном отношении совершенно равноценны.

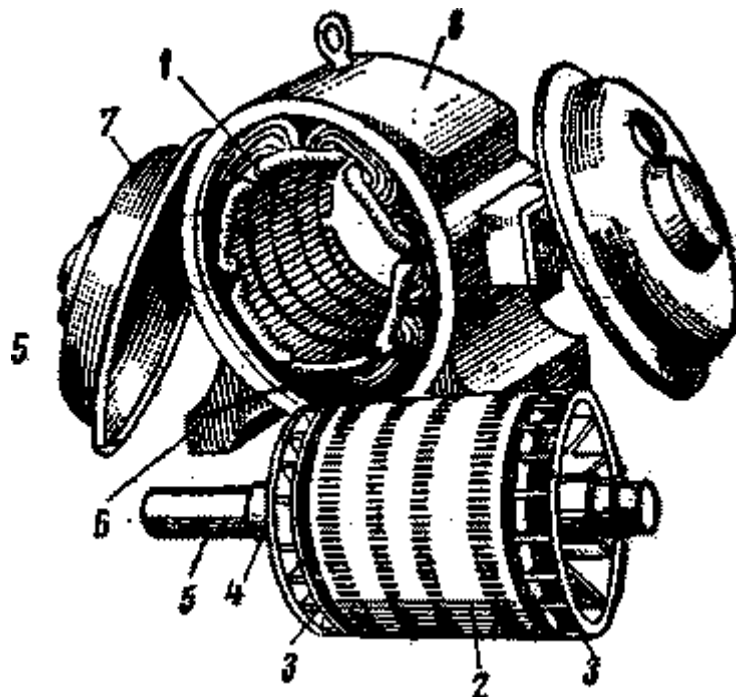


Рис. 2. 2. Асинхронный двигатель защищенного исполнения в разобранном виде;
1 – статор; 2 – ротор; 3 – вентиляционные лопасти; 4 – подшипники; 5 – вал;
6 – лапы для крепления; 7 – подшипниковый щит; 8 – корпус.

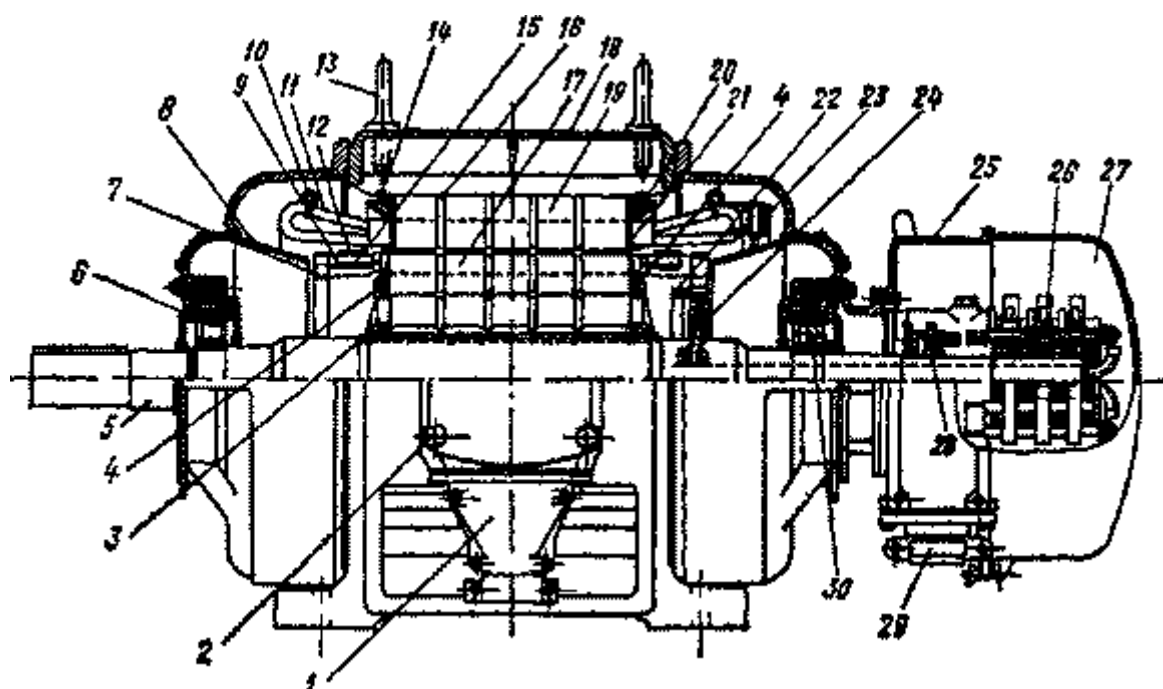


Рис. 2. 3. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором 180 кВт, 975 об. мин.: 1 – кабельная муфта; 2 – выводная коробка концов обмотки статора; 3 – кольцевые шпонки крепления сердечника ротора; 4 – нажимные шайбы сердечника ротора; 5 – вал ротора; 6 и 30 – шариковый и роликовый подшипники; 7 – медные соединительные хомуты стержней обмотки ротора; 8 – диффузоры для направления поступающего через подшипниковые щиты охлаждающего воздуха; 9 – стержни обмотки ротора; 10 – бандажные кольца; 11 – обмотка статора; 12 – проволоочные бандажки ротора; 13 – подъемные кольца; 14 – дуговые шпонки; 15 – кольцевые изоляционные прокладки; 16 – радиальные вентиляционные каналы; 17 – сердечник ротора; 18 – литой корпус статора; 19 – сердечник статора; 20 и 21 – нажимные пальцы и кольца сердечника статора; 22 – кольцо для соединения концов обмотки ротора в звезду; 23 – кольцо для соединения концов обмотки статора в звезду; 24 – кольцо для соединения концов обмотки статора в треугольник; 25 – клеммная коробка; 26 – клеммы; 27 – клеммная колодка; 28 – клеммная колодка; 29 – клеммная колодка; 30 – подшипник.

23 – междукатушечные и междугрупповые соединения обмотки статора; 24 – выводы концов обмотки ротора к контактному кольцу; 25 и 27 – коробка и колпак контактных колец; 26 – контактные кольца; 28 – подвижная втулка с контактами для замыкания выводов обмотки ротора накоротко; 29 – муфта для вывода концов обмотки ротора к внешней цепи

На практике обычно применяются обмотки петлевые. Волновые обмотки в основном используются в случае, когда число витков в катушке равно единице. Большинство обмоток переменного тока выполняется с углом фазной зоны $\alpha = 60^\circ$. Обмотки с углом фазной зоны $\alpha = 120^\circ$ применяются редко. Обмотки могут выполняться как с целым, так и с дробным числом пазов на полюс и фазу q .

2. 2. Простейшая трехфазная двухполюсная двухслойная сосредоточенная петлевая обмотка.

Исходные данные:

- число пазов статора $Z = 6$
- число полюсов $2p = 2$
- число фаз обмотки $m = 3$

Расчет обмотки:

число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{6}{2 \times 3} = 1$$

полюсное деление обмотки:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{6}{2} = 3$$

шаг обмотки принимаем равным полюсному делению (обмотка с полным шагом), $y = \tau = 6$.

угол сдвига эдс двух соседних пазов статора:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{1 \times 360^\circ}{6} = 60^\circ$$

– угол фазной зоны обмотки:

$$\alpha = q \times \gamma = 1 \times 60^\circ = 60^\circ$$

т. е. обмотка с углом фазной зоны $\alpha = 60^\circ$.

Порядок выполнения развернутой схемы обмотки: предварительно строится звезда пазовых эдс , на которой распределяются пазы по фазным зонам. Звезда строится с учетом угла γ . При распределении пазов по фазным зонам в двухслойных обмотках переменного тока пользуются следующими правилами:

- число катушек в катушечной группе всегда равно числу пазов на полюс и фазу q . В нашем примере $q = 1$. Катушечная группа состоит из одной катушки;
 - различают катушечные группы фазных зон А, В, С, Х, Y, Z;
 - катушечные группы А, В, С сдвинуты в пространстве на 120° электрических.
- Также на 120° эл. сдвинуты в пространстве катушечные группы Х, Y, Z;
- катушечные группы фазных зон А и Х, В и Y, С и Z сдвинуты в пространстве на 180° электрических.

Звезда пазовых эдс и распределение пазов по фазным зонам согласно приведенным правилам показаны на рис. 2. 4.

Как следует из звезды пазовых эдс фаза обмотки А должна укладываться в 1 и 4 пазы, фаза В в 3 и 6 пазы, а фаза С в 5 и 2 пазы. Каждая фаза состоит из двух катушек соответственно фазных зон А и Х, В и Y, С и Z.

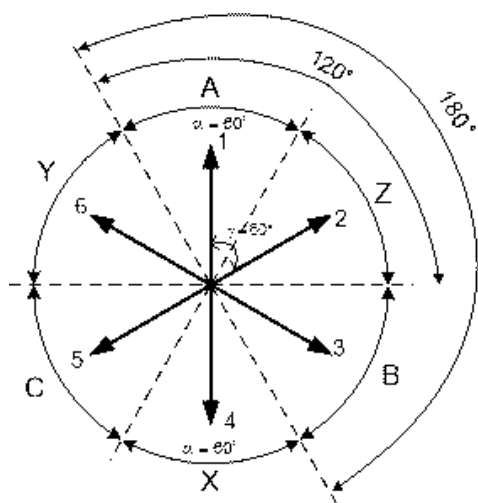


Рис. 2. 4. Звезда пазовых эдс и распределение пазов по фазным зонам.

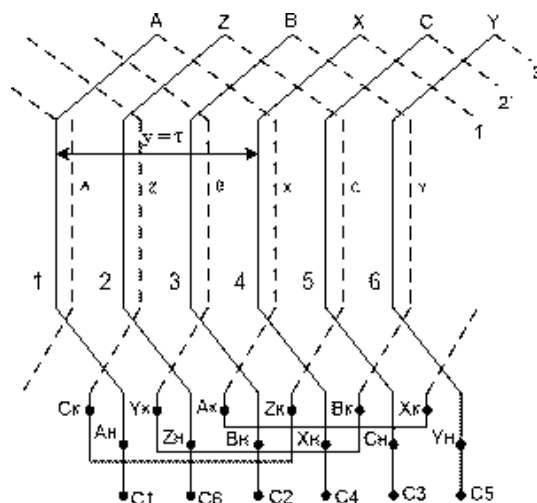


Рис. 2. 5. Развернутая схема двухслойной сосредоточенной петлевой обмотки со следующими данными:
 $Z = 6, 2p = 2, q = 1, y = \tau = 3, \alpha = 60^\circ$.

На основании звезды пазовых эдс с распределением пазов по разным зонам легко построить развернутую схему обмотки. На рис. 2. 5. показана развернутая схема обмотки для заданных исходных данных. Катушки для упрощения схемы показаны одновитковыми $w_k = 1$.

Для обмоток с фазной зоной $\alpha = 60^\circ$ обязательное чередование фазных зон в последовательности А – Z – В – X – С – Y на одну пару полюсов.

Правила соединения фазных зон в фазу обмотки. Фазные зоны А и А, В и В, С и С, X и X, Y и Y, Z и Z соединяются последовательно или параллельно согласно. Фазные зоны А и X, В и Y, С и Z соединяются последовательно или параллельно встречно.

На рис. 2.6. катушки фазных зон А и X, В и Y, С и Z соединены последовательно встречно. Как видно из развернутой схемы обмотки в двухслойных обмотках число катушечных групп на одну фазу обмотки всегда равно числу полюсов. В нашем примере $2p = 2$ и число катушечных групп на фазу также равно двум, и для выполнения трехфазной обмотки необходимо 6 катушечных групп.

В трехфазных обмотках отдельные фазы объединяются в общую схему по схеме "звезда – Y" или по схеме "треугольник – Δ ". Для упрощения переключений в клеммной коробке машины начало обмоток разных фаз C1, C2, C3 и концы обмоток C4, C5, C6 размещаются на клеммной панели согласно рис. 2. 6.

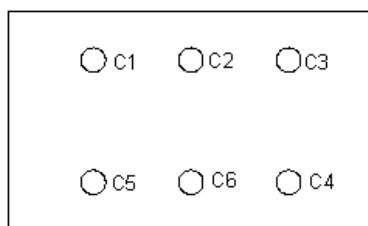


Рис. 2. 6. Порядок размещения выводов обмоток различных фаз на клеммной панели.

Тогда для соединения фаз обмоток по схеме "звезда" объединяются перемычками клеммы C5, C4, C6, а напряжение подается на клеммы C1, C2, C3. Это наглядно поясняет рис. 2. 7.

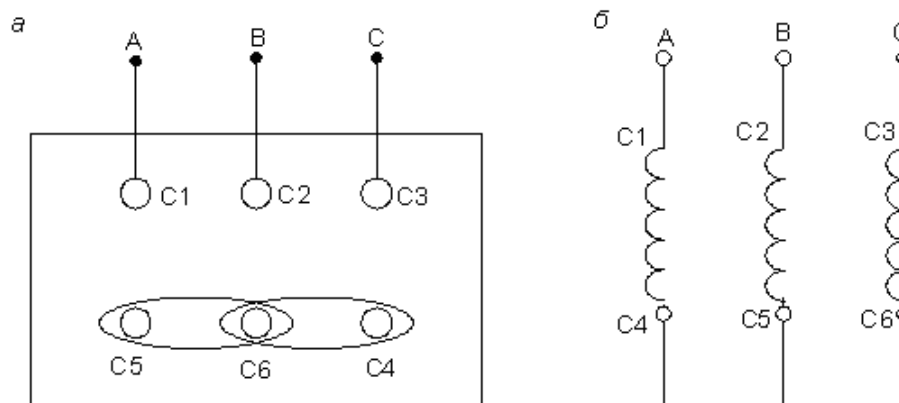


Рис. 2. 7. Порядок соединения и подключения клемм на панели (а);
схема соединения обмотки "звезда" (б).

На рис. 2. 8 показан порядок соединения клемм в коробке выводов машины при соединении обмоток фаз по схеме "треугольник".

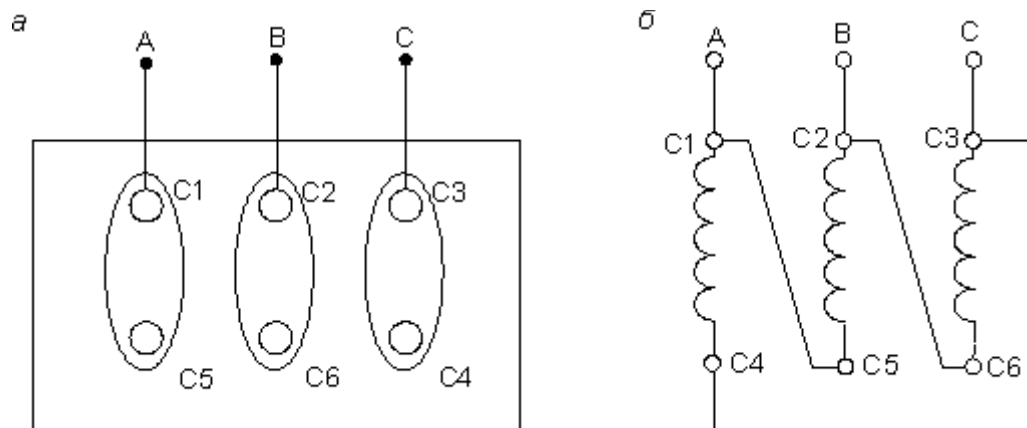


Рис. 2. 8. Порядок соединения и подключения клемм на панели (а);
схема соединения обмотки "треугольник" (б).

Таким образом, для выполнения трехфазной двухполюсной двухслойной сосредоточенной обмотки на статоре достаточно выполнить всего 6 пазов.

Однако на практике сосредоточенные обмотки не применяются, а выполняются распределенные с целым или дробным числом пазов на полюс и фазу q . Причем q может изменяться в зависимости от числа полюсов машины от $q = 2$, до $q = 7$ до. Чем меньше число полюсов тем больше принимается q . Число катушек в катушечной группе всегда равно числу пазов на полюс и фазу q . На рис. 2. 9 показана катушечная группа с $q = 2$ и $q = 4$.

Достаточно широко, особенно при перемотке статоров на новые параметры, применяются обмотки с дробным числом полюсов на полюс и фазу q . Такие обмотки называют дробными.

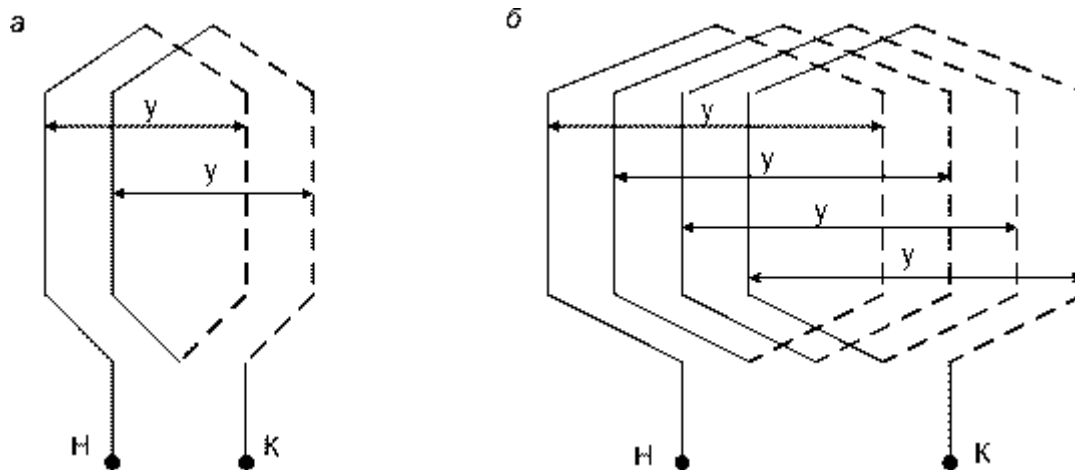


Рис. 2. 9. Катушечная группа с $q = 2$ (а); катушечная группа с $q = 4$ (б).

2. 3. Простейшая трехфазная двухполюсная однослойная сосредоточенная обмотка.

Для сравнения двухслойной и однослойной обмотки примем те же исходные данные, что и в предыдущем примере:

– число пазов статора – $Z = 6$

– число полюсов – $2p = 2$

– число фаз обмотки – $m = 3$

Расчет обмотки:

– число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{6}{2 \times 3} = 1$$

– полюсное деление обмотки:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{6}{2} = 3$$

– шаг обмотки $y = \tau = 3$;

– угол сдвига эдс соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{1 \times 360^\circ}{6} = 60^\circ \text{ эл}$$

– угол фазной зоны:

$$\alpha = q \times \gamma = 1 \times 60^\circ = 60^\circ \text{ эл.}$$

На основании расчетов строится звезда пазовых эдс (рис. 2. 10), на которой распределяются пазы по фазным зонам.

На основании звезды пазовых эдс строится развернутая схема обмотки. Для упрощения схемы число витков катушки принято $w_k = 1$. При выполнении однослойных обмоток число катушечных групп принимается равным числу пар полюсов, т. е. в два раза меньше чем в двухслойных. Так, в нашем примере сосредоточенной трехфазной однослойной обмотки число катушек равно трем, по одной на каждую фазу. Причем катушка одной активной стороной выполняет фазную зону А, а другой – фазную зону Х. Соответственно для других фаз В и Y, С и Z. Сказанное поясняет рис. 2. 11. Развернутая схема рассматриваемой обмотки показана на рис. 2. 12.

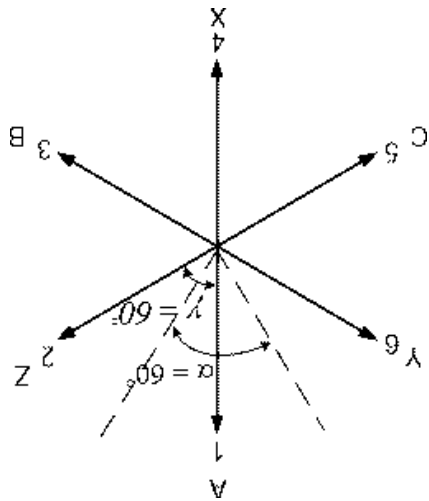


Рис. 2. 10. Звезда пазовых эдс и распределение пазов по фазным зонам.

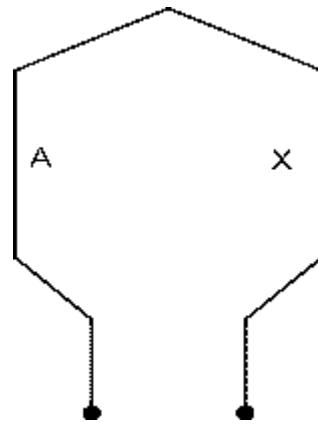


Рис. 2. 11. Катушка сосредоточенной трехфазной однослойной обмотки.

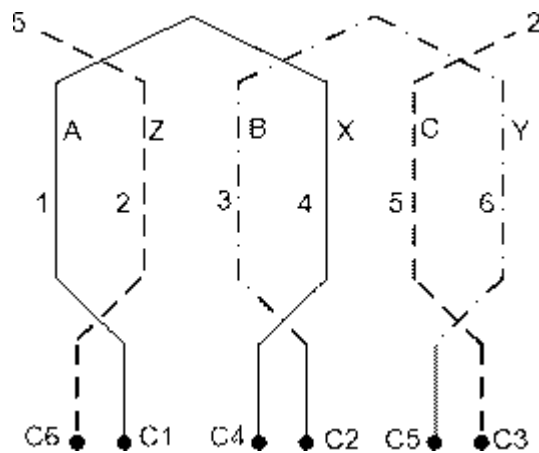


Рис. 2. 12. Развернутая схема трехфазной двухполюсной однослойной сосредоточенной обмотки: $Z = 6$, $2p = 2$, $q = 1$, $y = \tau = 3$, $\alpha = 60^\circ$.

На практике сосредоточенные обмотки не применяются. Обычно используются двухслойные и однослойные распределенные обмотки с числом пазов на полюс и фазу q больше единицы. В зависимости от мощности и числа полюсов q принимается в пределах от 2 до 7.

2. 4. Трехфазные петлевые двухслойные обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу.

2. 4. 1. Пример трехфазной четырехполюсной двухслойной петлевой обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с полным шагом.

Исходные данные:

- число пазов статора – $Z = 24$;
- число полюсов – $2p = 4$;
- число фаз обмотки – $m = 3$;

Расчет обмотки:

- число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{24}{4 \times 3} = 2$$

– полюсное деление обмотки:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

– шаг обмотки принимается равным полюсному делению $y = \tau = 6$, обмотка с полным шагом;

– угол сдвига эдс двух соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{24} = 30^\circ \text{ эл}$$

– угол фазной зоны обмотки:

$$\alpha = q \times \gamma = 2 \times 30^\circ = 60^\circ \text{ эл}$$

Обмотка с углом фазной зоны 60° эл. Такая обмотка имеет чередование фазных зон А – Z – В – X – С – Y на одну пару полюсов. На основании расчета строится звезда пазовых эдс, на которой делается распределение пазов по фазным зонам. Звезда пазовых эдс приведена на рис. 2. 13.

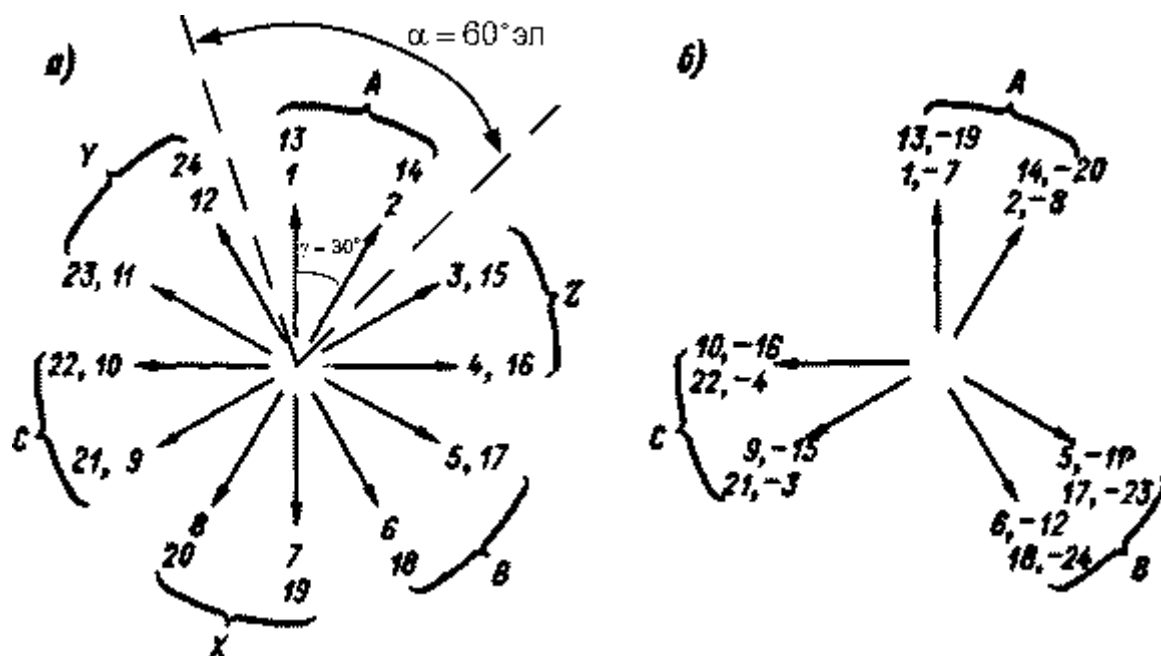


Рис. 2. 13. Звезда пазовых эдс обмотки.

Развернутая схема обмотки по расчетным данным и согласно звезде пазовых эдс приведена на рис. 2. 14.

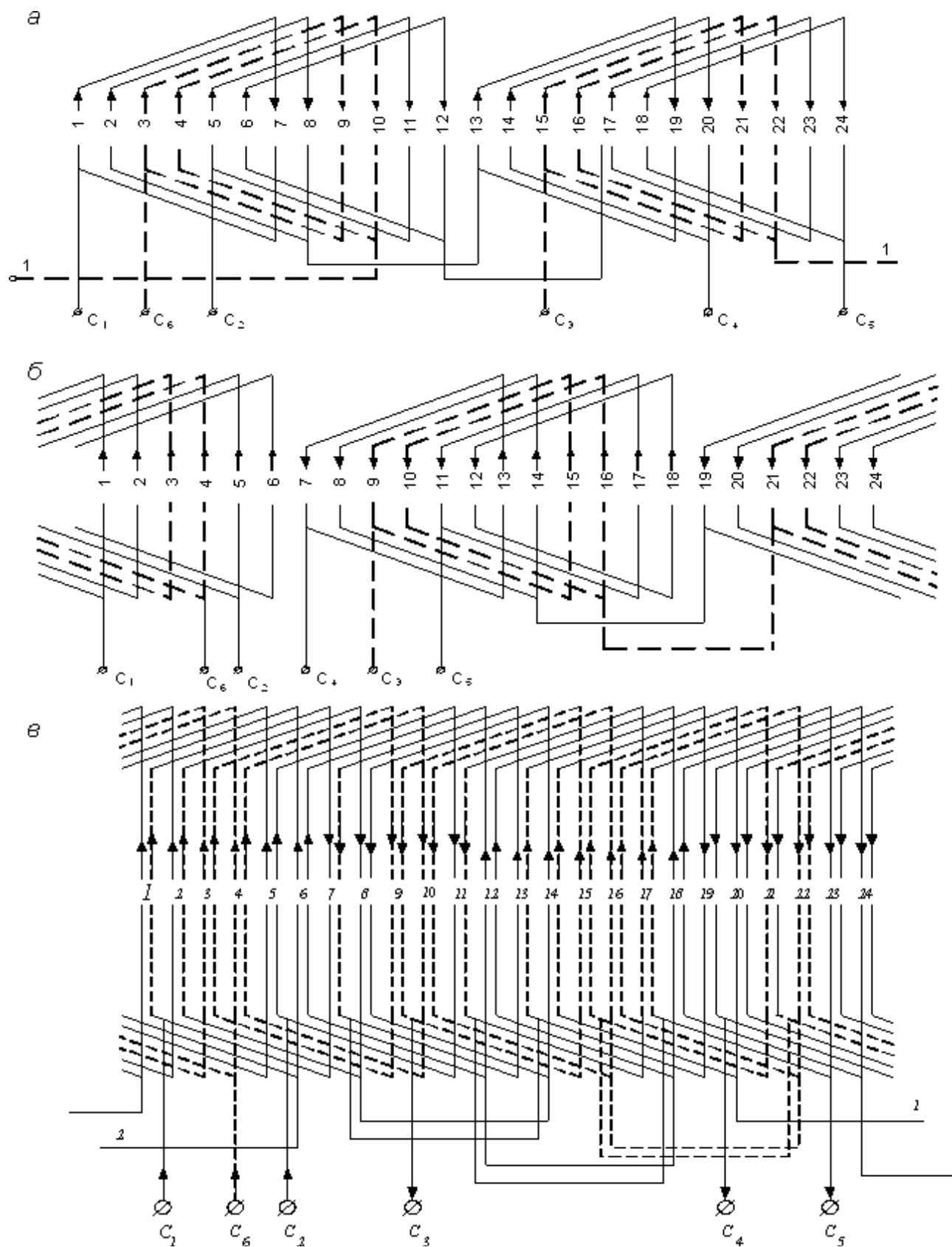


Рис. 2. 14. Трехфазная четырехполюсная двухслойная петлевая обмотка с целым числом пазов на полюс и фазу с полным шагом: $Z = 24, m = 3, 2p = 4, y = \tau = 6, \alpha = 60^\circ$,
 а – схема первого слоя; б – схема второго слоя; в – схема обмотки.

Направление токов i_a, i_b, i_c на развернутой схеме обмотки соответствует моменту времени t на волновой диаграмме токов, приведенной на рис. 2. 15.

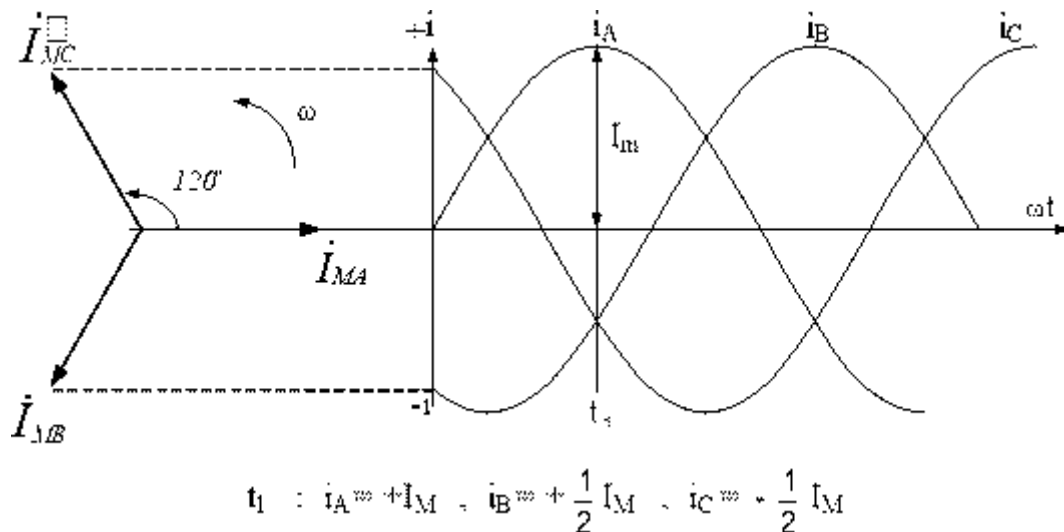


Рис. 2. 15. Векторная и волновая диаграммы токов фаз питающего напряжения.

2. 4. 2. Пример трехфазной четырехполюсной двухслойной петлевой обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с укороченным шагом.

Исходные данные:

- число пазов статора $Z = 24$
- число полюсов $2p = 4$
- число фаз обмотки $m = 3$

Расчет обмотки:

- число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{24}{4 \times 3} = 2$$

- полюсное деление обмотки:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

- шаг обмотки принимается равным на одно зубцовое деление меньше полюсного деления $y = \tau - 1 = 6 - 1 = 5$. Относительный шаг обмотки:

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{5}{6}$$

- угол сдвига эдс двух соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{24} = 30^\circ \text{ эл}$$

- угол фазной зоны обмотки $\alpha = q \times \gamma = 2 \times 30^\circ = 60^\circ \text{ эл}$.

Таким образом, обмотка получается шестизонная с углом фазной зоны $\alpha = 60^\circ \text{ эл}$. и чередованием фазных зон А – Z – В – X – С – Y на одну пару полюсов. Звезда пазовых эдс и распределение пазов по фазным зонам приведена на рис. 2. 13.

Развернутая схема трехфазной петлевой обмотки с укороченным шагом выполненная по расчетным данным и звезде пазовых эдс показана на рис. 2. 16.

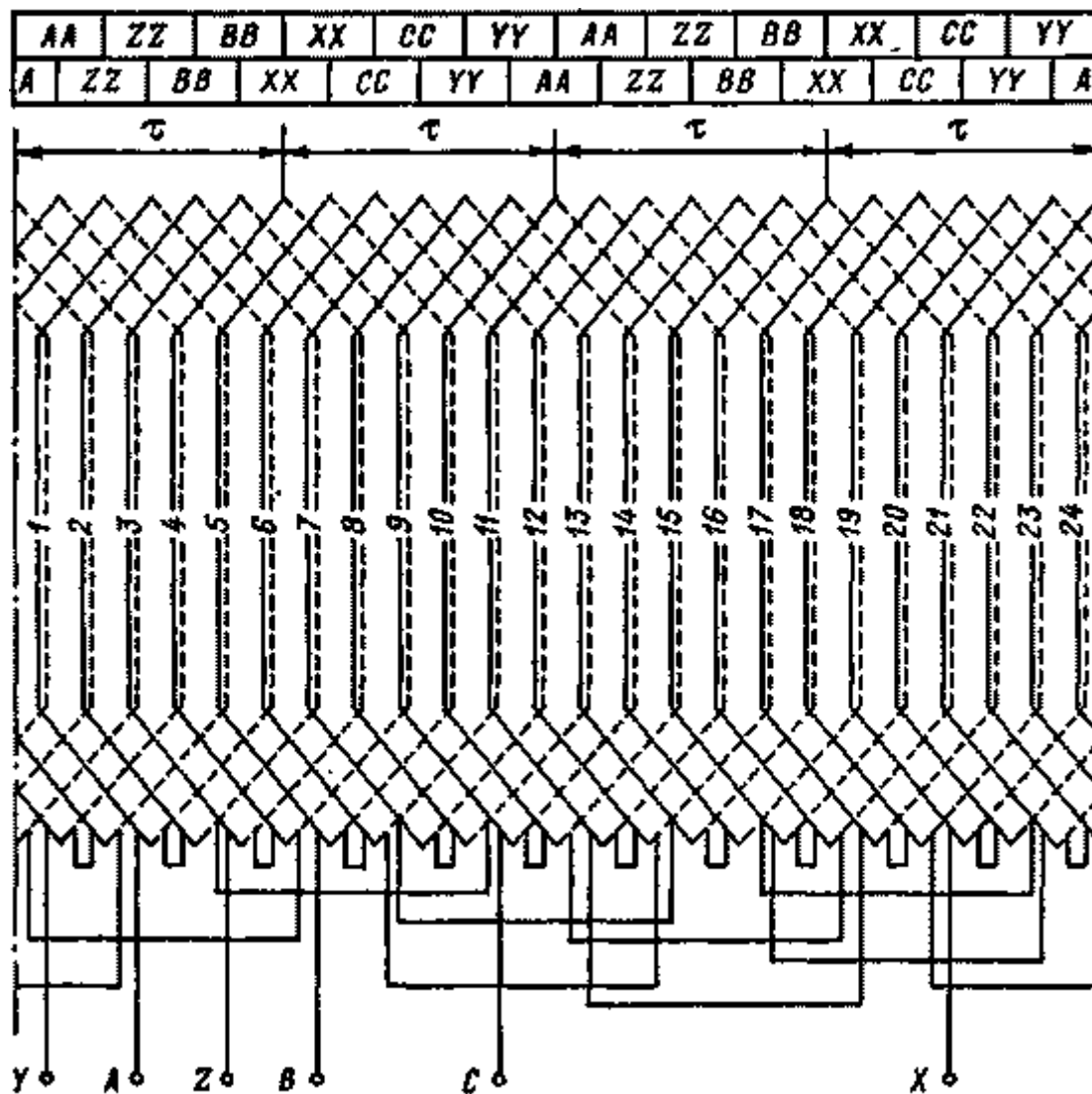


Рис. 2. 16. Развернутая схема трехфазной петлевой обмотки с укороченным шагом:
 $Z = 24, m = 3, 2p = 4, q = 2, y = 5, \beta = 5\%$.

На рис. 2. 17. показаны различные способы соединения катушечных групп фазы обмотки для получения различного числа пар параллельных ветвей.

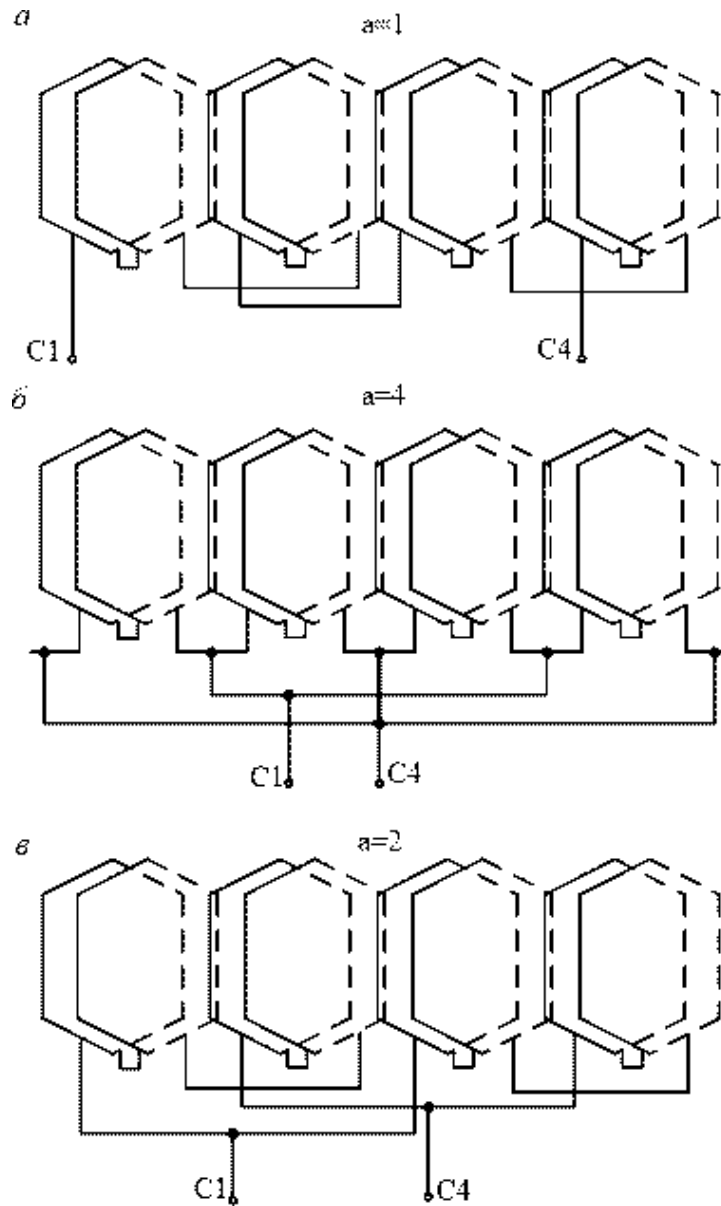


Рис. 2. 17. Различные способы соединения катушечных групп фазы обмотки при: $q = 2, 2p = 4$: а – последовательное ($a = 1$); б – параллельное ($a = 4$); в – смешанное ($a = 2$)

2. 4. 3. Пример трехфазной двухполюсной петлевой обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с укороченным шагом.

Исходные данные:

- число пазов статора $Z = 12$
- число полюсов $2p = 2$
- число фаз обмотки $m = 3$

Расчет обмотки:

- число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{12}{2 \times 3} = 2$$

- полюсное деление обмотки:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{12}{2} = 6$$

- шаг обмотки y укорочен на одно зубцовое деление относительно полюсного деления $y = \tau - 1 = 6 - 1 = 5$. Относительный шаг обмотки $\beta = 5\%$.

– угол сдвига ε дс двух соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{1 \times 360^\circ}{12} = 30^\circ \text{ эл}$$

– угол фазной зоны обмотки $\alpha = q \times \gamma = 2 \times 30^\circ = 60^\circ$ эл.

Обмотка с углом фазной зоны $\alpha = 60^\circ$ ее называют шестизонной. Обмотка с углом фазной зоны $\alpha = 120^\circ$ эл. называют трехзонной.

Звезда пазовых ε дс и распределение пазов по фазным зонам приведена на рис. 2. 18.

Развернутая схема трехфазной двухполюсной обмотки приведена на рис. 2. 19.

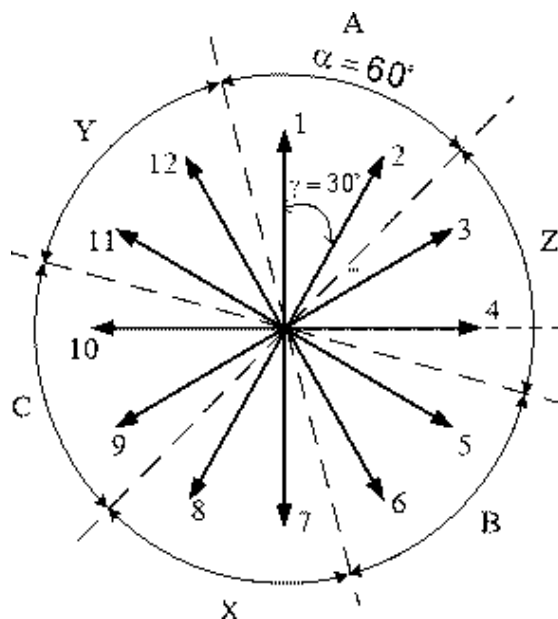


Рис. 2. 18. Звезда пазовых ε дс и распределение пазов по фазным зонам обмотки:
 $Z = 12, m = 3, 2p = 2, q = 2, \alpha = 60^\circ$.

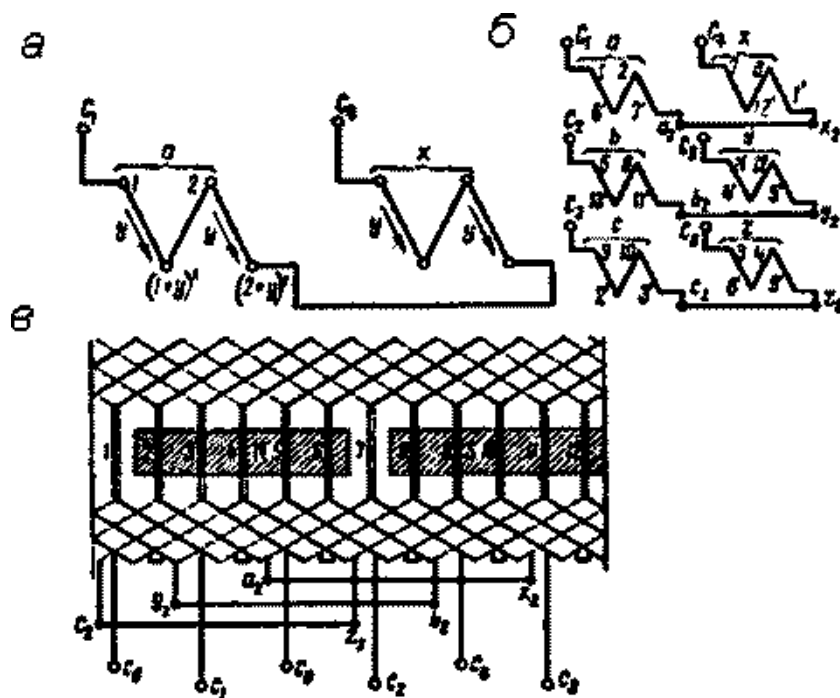


Рис. 2. 19. Шестизонная трехфазная двухполюсная петлевая обмотка
 $Z = 12, m = 3, 2p = 2, q = 2, y = 5, \beta = 5/6$. а – таблица схемы обмотки в общем виде для одной фазы; б – таблица фаз обмотки; в – схема обмотки.

2. 4. 4. Пример трехфазной шестиполусной двухслойной петлевой обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с укороченным шагом.

Исходные данные:

– число пазов статора $Z = 72$

– число полюсов $2p = 6$

– число фаз обмотки $m = 3$

Расчет обмотки:

– число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{72}{6 \times 3} = 3$$

– полюсное деление обмотки

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{72}{6} = 12$$

– шаг обмотки укорачиваем по сравнению с полюсным делением на два зубцовых деления $y = \tau - 2 = 12 - 2 = 10$. Относительный шаг обмотки:

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{10}{12} = \frac{5}{6}$$

– угол сдвига эдс двух соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{3 \times 360^\circ}{72} = 20^\circ \text{ эл}$$

– угол фазной зоны обмотки $\alpha = q \times \gamma = 3 \times 20^\circ = 60^\circ \text{ эл}$.

Звезда пазовых эдс и распределение пазов по фазным зонам приведена на рис. 2. 20, а развернутая схема обмотки – на рис. 2. 21.

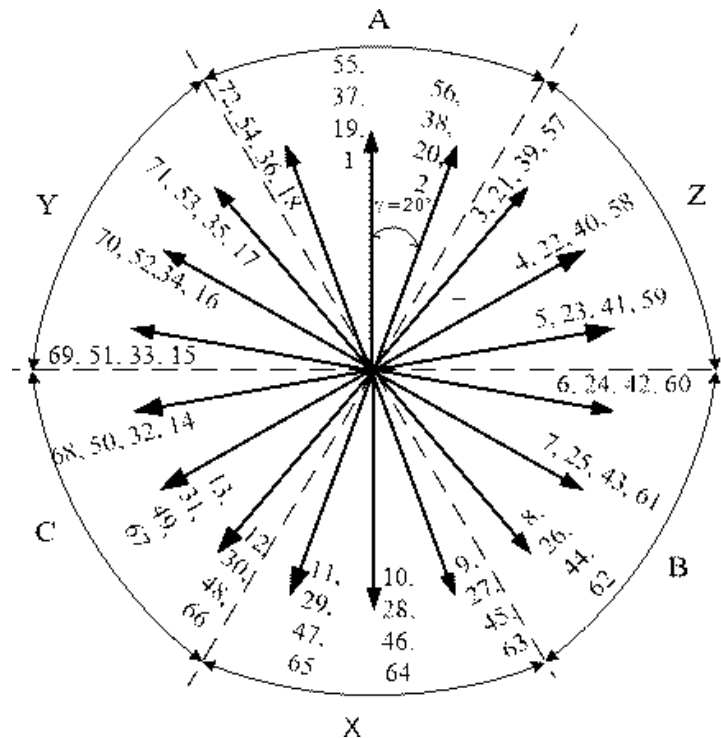


Рис. 2. 20. Звезда пазовых эдс и распределение пазов по фазным зонам $Z = 72, m = 3, 2p = 6, q = 3, \alpha = 60^\circ$.

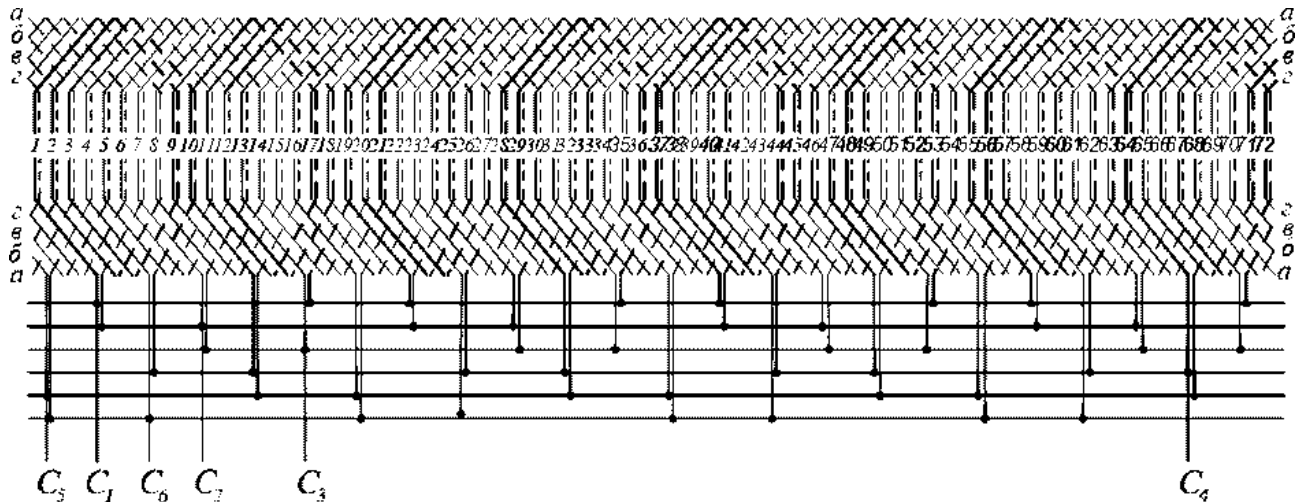


Рис. 2. 21. Схема трехфазной двухслойной петлевой обмотки
 $Z = 72, 2p = 6, m = 3, q = 3, y = 10, a = 3, \tau = 12$.

2. 4. 5. Пример трехфазной шестиполюсной двухслойной волновой обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с укороченным шагом.

Исходные данные:

- число пазов статора – $Z = 36$
- число полюсов – $2p = 6$
- число фаз обмотки – $m = 3$

Расчет обмотки:

- число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{36}{6 \times 3} = 2$$

- полюсное деление обмотки:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{36}{6} = 6$$

- шаг обмотки принимаем укороченным на одно зубцовое деление по сравнению с полюсным делением $y = \tau - 1 = 6 - 1 = 5$. Относительный шаг обмотки:

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{5}{6}$$

- угол сдвига эдс двух соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{3 \times 360^\circ}{36} = 30^\circ \text{ эл}$$

- угол фазной зоны обмотки $\alpha = q \times \gamma = 2 \times 30^\circ = 60^\circ \text{ эл}$.

По расчетным данным строится звезда пазовых эдс обмотки и развернутая схема обмотки (рис. 2. 22).

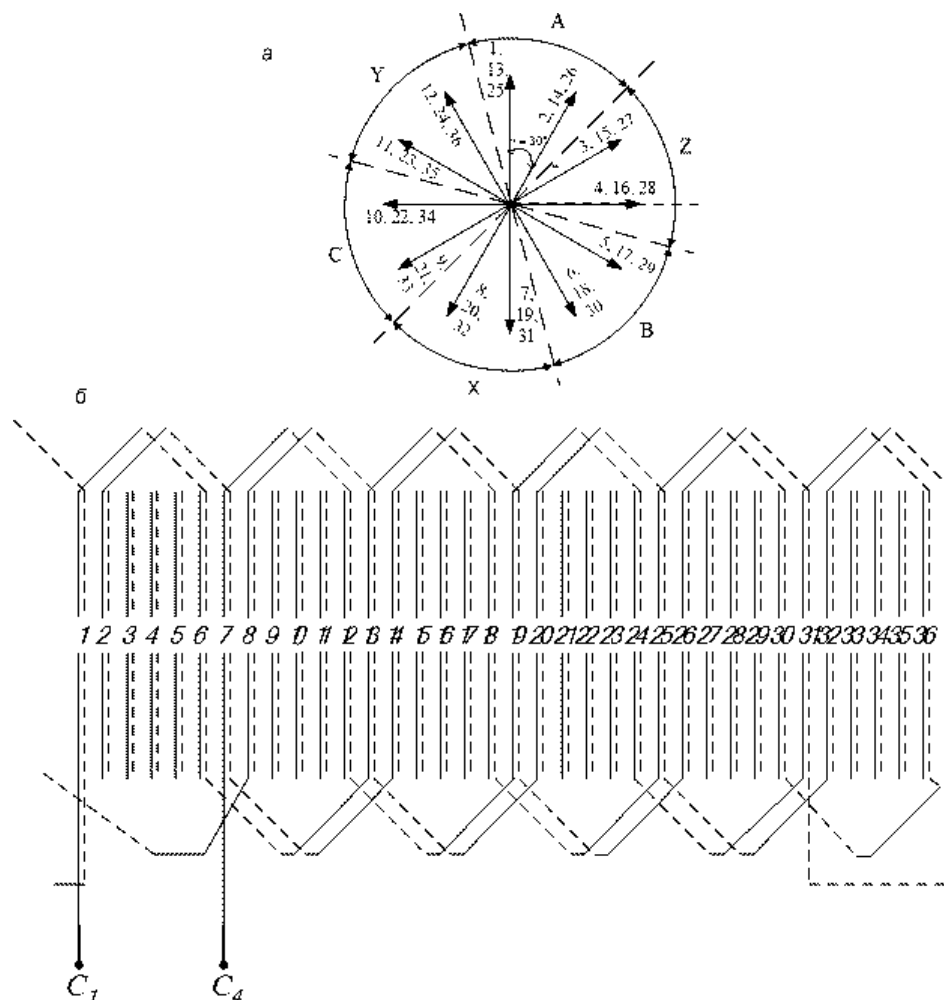


Рис. 2. 22. Порядок построения трехфазной шестиполюсной двухслойной волновой обмотки $2p = 6, m = 3, q = 2, \alpha = 60^\circ$: а – звезда пазов эдс; б – схема фазы А при $y = 12, y_1 = 5, y_2 = 7$.

2. 4. 6. Пример трехфазной восьмиполюсной двухслойной петлевой обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с полным шагом.

Исходные данные:

- число пазов статора – $Z = 48$
- число полюсов – $2p = 8$
- число фаз обмотки – $m = 3$

Расчет обмотки: число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{48}{8 \times 3} = 2$$

– полюсное деление обмотки:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{48}{8} = 6$$

– шаг обмотки принимаем равным полюсному делению $y = \tau = 6$

– угол сдвига эдс двух соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{4 \times 360^\circ}{48} = 30^\circ \text{ эл}$$

– угол фазной зоны обмотки $\alpha = q \times \gamma = 2 \times 30^\circ = 60^\circ \text{ эл}$.

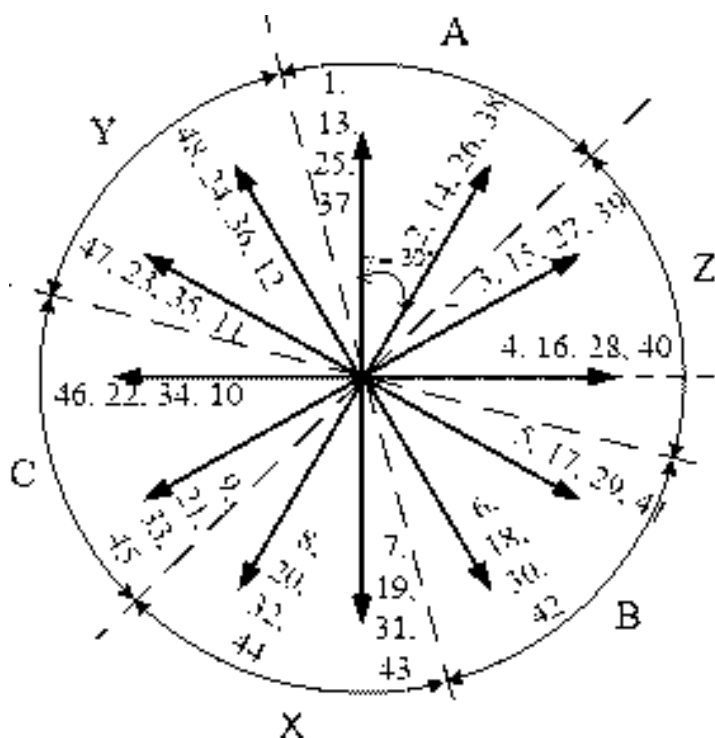


Рис. 2. 23. Звезда пазовых эдс и распределение пазов по фазным зонам
 $Z = 48, 2p = 8, m = 3, q = 2, y = \tau = 6,$
 $a = 60^\circ \text{ эл.}, a = 1, \gamma = 30^\circ \text{ эл.}$

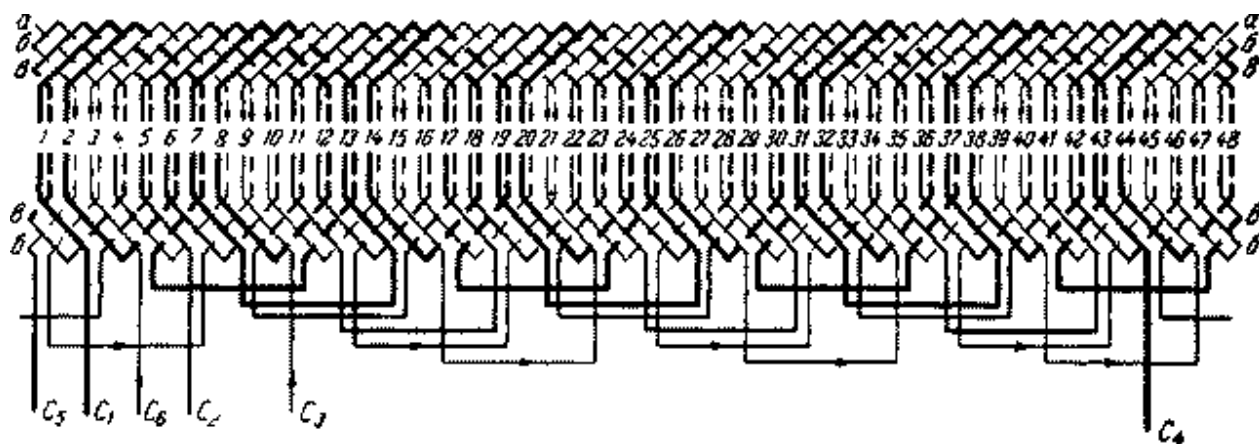


Рис. 2. 24. Схема трехфазной петлевой двухслойной обмотки с полным шагом
 $Z = 48, 2p = 8, m = 3, q = 2, y = \tau = 6, a = 60^\circ, a = 1.$

2. 4. 7. Пример трехфазной восьмиполюсной двухслойной петлевой обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с укороченным шагом.

Расчет обмотки представлен в подразд. 2. 4. 6, а звезда пазовых эдс и распределение пазов по фазным зонам на рис. 2. 23. Обмотки отличаются также и числом параллельных ветвей. Обмотка на рис. 2. 25 имеет две параллельные ветви, а на рис 2. 24 – четыре параллельные ветви. При сравнении схем видно, что число ветвей определяется схемой соединения лобовых частей катушечных групп в фазе.

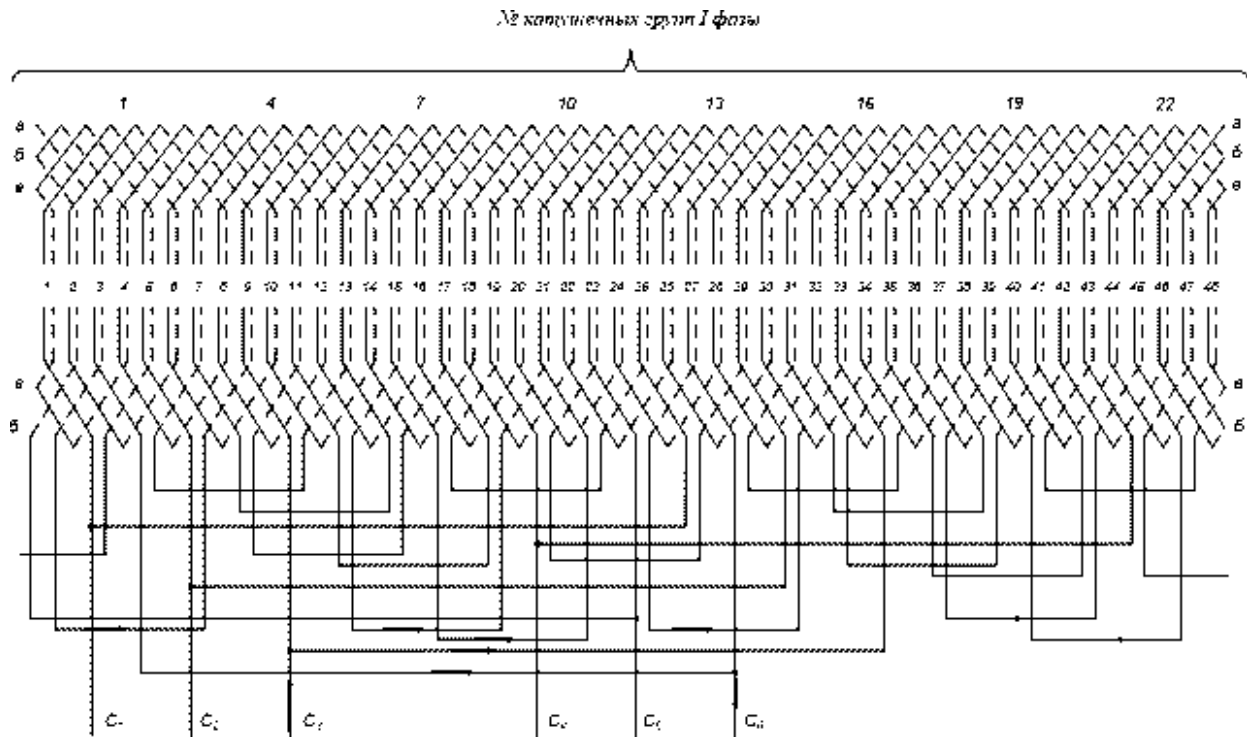


Рис. 2. 25. Схема трехфазной двухслойной петлевой обмотки с укороченным шагом
 $Z = 48, 2p = 8, m = 3, y = 5, q = 2, \alpha = 60^\circ, a = 2, \tau = 6$.

2. 5. Двухслойные обмотки машин переменного тока с дробным числом пазов на полюс и фазу.

2. 5. 1. Общие сведения об обмотках с дробным значением числа пазов на полюс и фазу.

Такие обмотки для упрощения часто называют дробными. Обмотки с дробным числом q применяют в многополюсных машинах (например, в гидрогенераторах), в которых из-за ограниченных размеров полюсного деления q может быть небольшим. Такие машины тихоходные и имеют большое число полюсов. Обмотки с дробным q позволяют при сравнительно небольшом общем числе пазов машины получить приближенную к синусоиде кривую $\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{C}$. Объясняется это тем, что последовательно соединенные группы катушек одной фазы, лежащие под разными полюсами, оказываются немного сдвинутыми в магнитном поле, что и ведет к уменьшению высших гармоник $\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{C}$.

Чтобы двухслойная обмотка с дробным числом на полюс и фазу была симметричной, т. е. в этой обмотке $\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{C}$ всех фаз были равны и имели бы сдвиг на один и тот же угол $360^\circ/m$, необходимо выполнение условия:

$$\frac{Z}{m \times t} = \text{целое число}$$

где t – наибольший общий делитель общего числа пазов машины Z и числа пар полюсов p ; m – число фаз обмотки. Для двухслойных обмоток с дробным q распределение верхних сторон в пазах по фазам удобно производить путем построения специальной таблицы. Для этого число пазов на полюс и фазу записывается следующим уравнением:

$$q = b + \frac{c}{d}$$

и представляется затем в виде неправильной дроби:

$$q = \frac{N}{d}$$

в этих уравнениях: b – целая часть дробного числа q ; c и d – соответственно числитель и знаменатель дробной части q ; $N = b \times d + c$ – числитель неправильной дроби.

Например, если

$$q = 3\frac{1}{2}, c = 1, d = 2, N = 3 \times 2 + 1 = 7$$

Далее составляется сетка для таблицы с числом строк, равным числу полюсов $2p$, и числом столбцов, равным $3N$. Столбцы разделяются на три одинаковые по ширине части. Каждая часть относится к определенной фазе и содержит N клеток по горизонтали. Затем в клетки с шагом равным d , последовательно вписываются номера пазов; номера пазов в N столбцах показывают, что в них располагаются верхние стороны катушек одной фазы. На развернутой схеме обмотки соединение верхних сторон катушек с нижними производится с шагом y . Шаг y рассчитывается, он близок по величине к τ и всегда равен целому числу. Согласно вышеизложенному строится таблица распределения верхних катушечных сторон фаз в пазах статора (табл. 2. 1).

Таблица 2. 1. Распределение верхних катушечных сторон фаз в пазах статора.

Полюсы	Фазы											
	А				В				С			
1	1	d	2	d	3	d	4					
2	5	d	6	d	7	d	8					
3	9	d	10	d	11	d	12					
4	13	d	14	d	15	d	16					
5	17	d	18	d	19	d	20					
6	21	d	22	d	23	d	24					
$N = 4$				$N = 4$				$N = 4$				$3N$

Таблица соответствует

$$q = 1\frac{1}{3} = \frac{4}{3}, m = 3, 2p = 6, q = \frac{4}{3} = Z/2pm, Z = 2pmq = 6 \times 3 \times \frac{4}{3} = 24$$

Таким образом, $N = 4$, $3N = 12$, $2p = 6$, $d = 3$. К сожалению, для данного примера обмотка несимметрична, так как не выполнено условие Z/mt – целое число.

2. 5. 2. Пример трехфазной шестиполюсной петлевой обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу.

Исходные данные:

- число пазов статора – $Z = 27$
- число фаз – $m = 3$
- число полюсов – $2p = 6$

Расчет обмотки:

- число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{27}{6 \times 3} = \frac{3}{2} = 1\frac{1}{2} = 1 + \frac{1}{2}$$

– полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{27}{6} = 4,5$$

– шаг обмотки $y = 4$; укороченный шаг относительно τ на 0,5; относительный шаг обмотки:

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{4}{4,5} = 0,88$$

Так как:

$$q = 1 + \frac{1}{2} = b + \frac{c}{d} = \frac{b \times d + c}{d} = \frac{N}{d} = \frac{3}{2}$$

то:

$$N = 3, d = 2, 2p = 6, Z = 27, y = 4$$

По этим данным строим сетку таблицы с числом строк, равным $2p = 6$, числом вертикальных столбцов, равным $3N = 3 \times 3 = 9$ и впишем в нее номера пазов с шагом $d = 2$. Каждые N столбцов принадлежат последовательно фазе А, В и С. Эта таблица показывает распределение верхних катушечных сторон фаз в пазах статора (табл. 2.2).

Таблица 2. 2. Распределение верхних катушечных сторон фаз в пазах статора.

Полюс	Фаза								
	А			В			С		
1	1		2		3		4		5
2		6		7		8		9	
3	10		11		12		13		14
4		15		16		17		18	
5	19		20		21		22		23
6		21		25		26		27	

По данным табл. 2. 2 и шагу обмотки $y = 4$ построена развернутая схема одной фазы А петлевой обмотки статора с дробным q , которая показана на рис. 2. 26. Аналогично строятся развернутые схемы других фаз обмотки В и С.

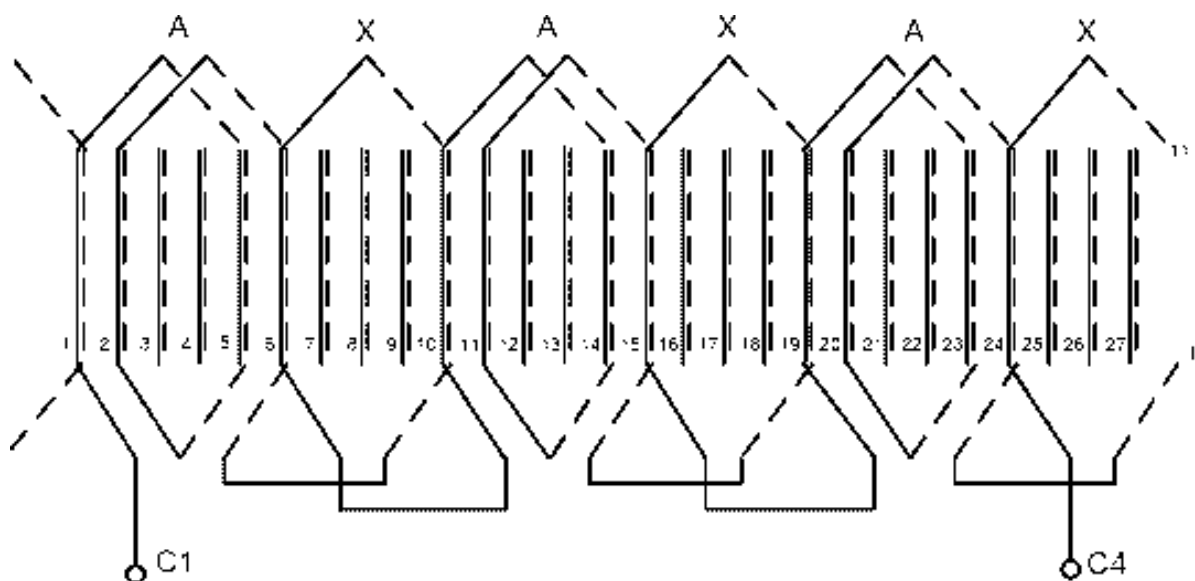


Рис. 2. 26. Развернутая схема фазы А трехфазной петлевой обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу: $Z = 27, 2p = 6, m = 3, \tau = 4,5, y = 4, q = 1\frac{1}{2}$.

Угол сдвига эдс соседних пазов статора определяется по выражению:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{3 \times 360^\circ}{27} = 40^\circ \text{ эл.}$$

Тогда угол фазной зоны обмотки:

$$\alpha = q \times \gamma = 1 \frac{1}{2} \times 40 = 60^\circ \text{ эл.}$$

Таким образом, обмотка с углом фазной зоны 60° (шестизонная обмотка). В таких обмотках чередование фазных зон: А – Z – В – X – С – Y на одну пару полюсов.

2. 5. 3. Пример трехфазной двухслойной четырехполюсной петлевой обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу.

Исходные данные:

- число пазов статора – $Z = 30$;
- число фаз – $m = 3$;
- число полюсов – $2p = 4$.

Расчет обмотки:

- число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{30}{4 \times 3} = \frac{3}{2} = 2 \frac{1}{2} = 2 + \frac{1}{2}$$

- полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{30}{4} = 7,5$$

- шаг обмотки $y = 7$. Обмотка с укороченным шагом $y < \tau$;
- угол сдвига эдс соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{30} = 24^\circ \text{ эл.}$$

- угол фазной зоны обмотки:

$$\alpha = q \times \gamma = 2 \frac{1}{2} \times 24 = 60^\circ \text{ эл.}$$

Обмотка с фазной зоной $\alpha = 60$ и с чередованием фазных зон: А–Z–В–X–С–Y на одну пару полюсов. Заменяем q в виде выражения:

$$q = b + \frac{c}{d}$$

и представляем его в виде неправильной дроби:

$$q = \frac{N}{d}$$

где b – целая часть дробного числа q ; c и d – соответственно числитель и знаменатель его дробной части; $N = (b \times d + c)$ – числитель неправильной дроби.

Строим сетку для таблицы с числом строк, равным числу полюсов $2p = 4$, числом вертикальных столбцов, равным $3 \times N = (2 \times 2 + 1) = 15$, столбцы разделяются на три равные по ширине части $15/3 = 5$. Каждая часть относится к определенной фазе, например, А, В, С и содержит $N = 5$ клеток по горизонтали. Затем в клетки с шагом равным $d = 2$, последовательно вписывают номера пазов. Номера пазов в столбцах показывают, что в них располагаются верхние стороны катушек данной фазы.

На развернутой схеме обмотки соединение верхних сторон катушек с нижними производится с шагом y . На основании этой методики строится таблица распределения верхних катушечных сторон фаз в пазах статора, табл. 2. 3.

Таблица 2. 3. Распределение верхних катушечных сторон фаз в пазах статора.

Полюсы	Фазы															
	А								В							
	1	d	2	d	3	d	4	d	5	d	6	d	7	d	8	
2		9		10		11		12		13		14		15		
3	16		17		18		19		20		21		22		23	
4		24		25		26		27		28		29		30		
$2p = 4$																
$N = 5$ $N = 5$ $3N = 15$																

На основании табл. 2. 3. строится развернутая схема фазы А петлевой двухслойной обмотки с дробным $q = 2\frac{1}{2}$. Аналогично согласно таблице легко построить развернутые схемы обмотки для фаз В и С.

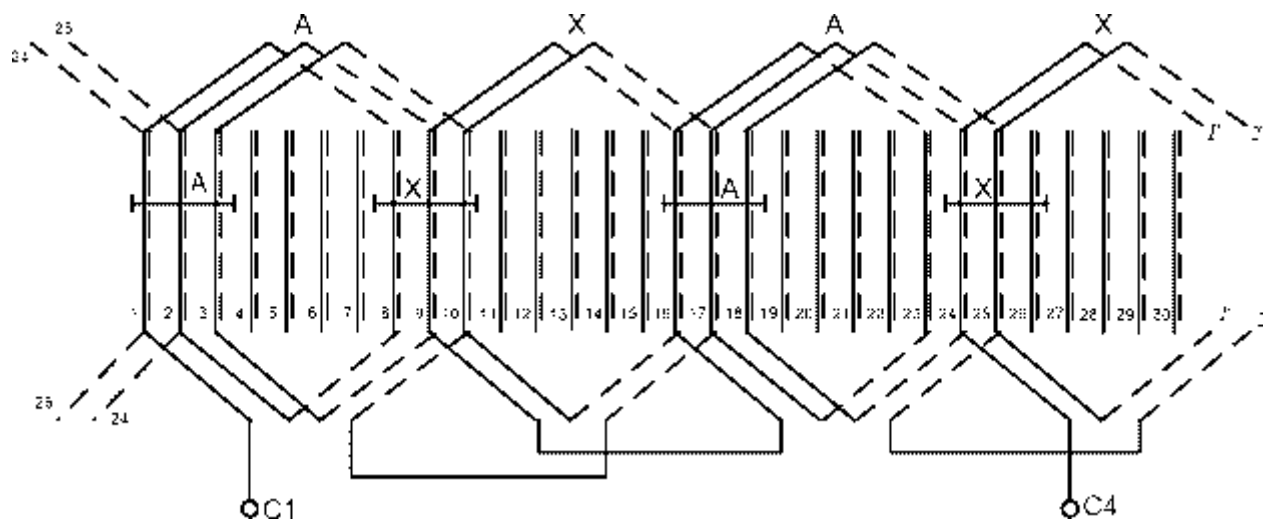


Рис. 2. 27. Развернутая схема фазы А двухслойной дробной петлевой обмотки:
 $Z = 30, 2p = 4, \tau = 7,5, y = 7, q = 2\frac{1}{2}$.

Известно, что общее число катушечных групп в трехфазных двухслойных обмотках равно произведению числа полюсов на число фаз. В данном примере $2p = 4, m = 3$, число катушечных групп будет равно 12. Как видно из развернутой схемы рис. 2. 27, каждая фаза состоит из четырех катушечных групп. Причем две состоят из трех катушек, а другие две – из двух катушек. Возможны различные варианты соединения их в схеме обмотки по каждой фазе. На рис. 2. 28 показаны два варианта чередования катушечных групп в трехфазной петлевой обмотке с дробным числом пазов на полюс и фазу. В числителе дроби в клетке схемы указывается номер катушечной группы (их 12), а в знаменателе – число катушек в соответствующей катушечной группе.

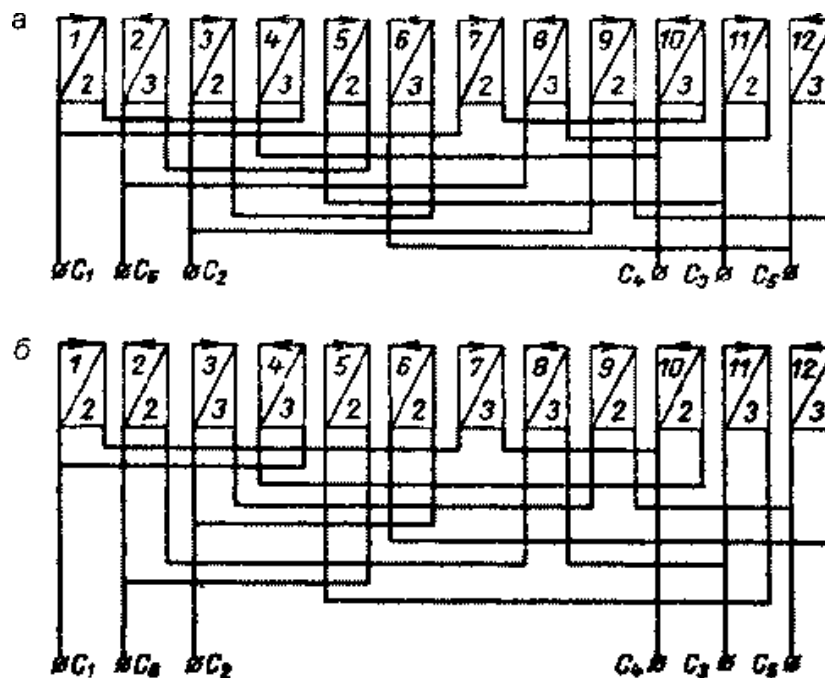


Рис. 2. 28. Схема соединения трехфазной петлевой обмотки с дробным q :
 $Z = 30, m = 3, 2p = 4, q = 2\frac{1}{2}, \tau = 7,5, y = 7, a_2 = 2$; а – группировка катушечных групп в чередовании 2, 3, 2, 3; б – группировка катушечных групп в чередовании 2, 2, 3, 3

2. 5. 4. Пример трехфазной четырехполюсной двухслойной петлевой обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу.

Исходные данные:

- число пазов статора – $Z = 18$
- число фаз – $m = 3$
- число полюсов – $2p = 4$

Расчет обмотки:

- число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{18}{4 \times 3} = \frac{3}{2} = 1\frac{1}{2}$$

- полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{18}{4} = 4,5$$

- шаг обмотки $y = 4$. Обмотка с укороченным шагом $y < \tau$;
- угол сдвига эдс соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{18} = 40^\circ \text{ эл.}$$

- угол фазной зоны обмотки:

$$\alpha = q \times \gamma = 1\frac{1}{2} \times 40 = 60^\circ \text{ эл.}$$

Обмотка с фазной зоной 60° имеет порядок чередования А–З–В–Х–С–У на пару полюсов. Число пазов на полюс и фазу представим в виде:

$$q = b + \frac{c}{d} = 1 + \frac{1}{2} = \frac{3}{2}$$

где b – целая часть дробного числа, $b = 1$; c – числитель дробной части, $c = 1$; d – знаменатель дробной части, $d = 2$; N – числитель неправильной дроби, $N = b \times d + c = 3$. Число полюсов обмотки $2p = 4$. По этим данным строится табл. 2.5.

Таблица 2. 5. Распределение верхних катушечных сторон фаз в пазах статора.

Полюса	Фазы								
	А			В			С		
1	1	d	2		3		4		5
2		6		7		8		9	
3	10		11		12		13		14
4		15		16		17		18	
$N = 3$			$N = 3$			$N = 3$			

Нижние стороны катушек выполняются на схеме с учетом шага обмотки $y = 4$. На рис. 2. 29 представлены построенные согласно табл. 2. 5 звезда пазовых эдс (рис. 2. 29, а), звезда эдс катушек фаз обмотки (рис. 2. 29, б), таблица фаз обмотки (рис. 2. 29, в), схема обмотки (рис. 2. 29, г). Как показывает рис. 2. 29 рассмотренная обмотка является трехфазной симметричной шестизонной с чередованием фаз А-З-В-Х-С-У-А-З-В-Х-С-У.

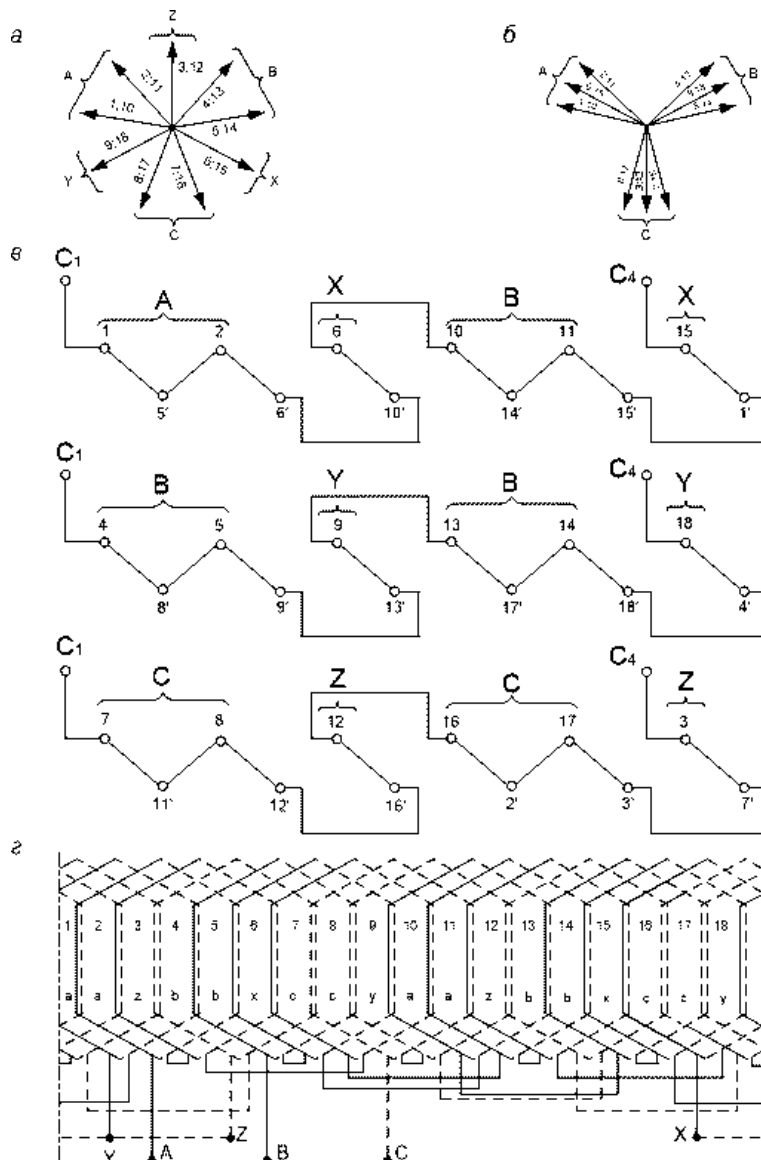


Рис. 2. 29. Трехфазная двухслойная обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу:

$$m = 3, 2p = 4, q = 1\frac{1}{2},$$

- а – звезда пазовых эдс;
- б – звезда эдс катушек фазы обмотки;
- в – таблица фаз обмотки;
- г – схема обмотки.

2. 5. 5. Пример трехфазной восьмиполюсной двухслойной петлевой обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу.

Исходные данные:

– число пазов статора – $Z = 30$

– число фаз – $m = 3$

– число полюсов – $2p = 8$

Расчет обмотки:

– число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{30}{8 \times 3} = \frac{30}{24} = 1 \frac{1}{4}$$

– полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{30}{8} = 3,75$$

– шаг обмотки $y = 3$. Обмотка с укороченным шагом $y < \tau$;

– угол сдвига эдс соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{4 \times 360^\circ}{30} = 48^\circ \text{ эл.}$$

– угол фазной зоны обмотки

$$\alpha = q \times \gamma = 1 \frac{1}{4} \times 48 = 60^\circ \text{ эл.}$$

Обмотка шестизонная с углом фазной зоны 60° и нормальное чередование фазных зон А – Z – В – X – С – Y на одну пару полюсов.

Для выполнения схемы обмотки воспользуемся таблицей распределения верхних катушечных сторон фаз в пазах статора (табл. 2. 6). Эта таблица строится по методике предложенной в пп 2. 5. 1. Чтобы выполнить эту таблицу представляют q в виде дроби:

$$q = b + \frac{c}{d}$$

где b – целая часть дробного числа, $b = 1$; c – числитель дробной части, $c = 1$; d – знаменатель дробной части, $d = 4$; преобразуем выражение в виде:

$$q = b + \frac{c}{d} = \frac{N}{d} \quad q = \frac{b \times d + c}{d} = \frac{1 \times 4 + 1}{4} = \frac{5}{4}$$

что позволит определить $N = 5$. Зная число полюсов $2p = 8$, легко построить таблицу распределения верхних катушечных сторон фаз в пазах статора. На основании табл. 2.6 строится развернутая схема обмотки статора (табл. 2. 6).

На рис. 2.30 представлена развернутая схема фазы А трехфазной восьмиполюсной двухслойной петлевой обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу (рис. 2. 30, а), представлены звезды пазовых эдс по парам полюсов и слоям (рис. 2. 30, б, в, г, д, е, ж). Полная звезда пазовых эдс показана на рис. 2. 30, з.

Таблица 2. 6. Распределение верхних катушечных сторон фаз в пазах статора.

Полюса	Фазы											
	А				В				С			
1	1	d	2	d	3				4			
2		5			6			7			8	
3			9		10				11			12
4				13		14			15			
5	16			17			18			19		
6		20			21			22			23	
7			24			25			26			27
8				28		29			30			
$N=5$				$N=5$				$N=5$				

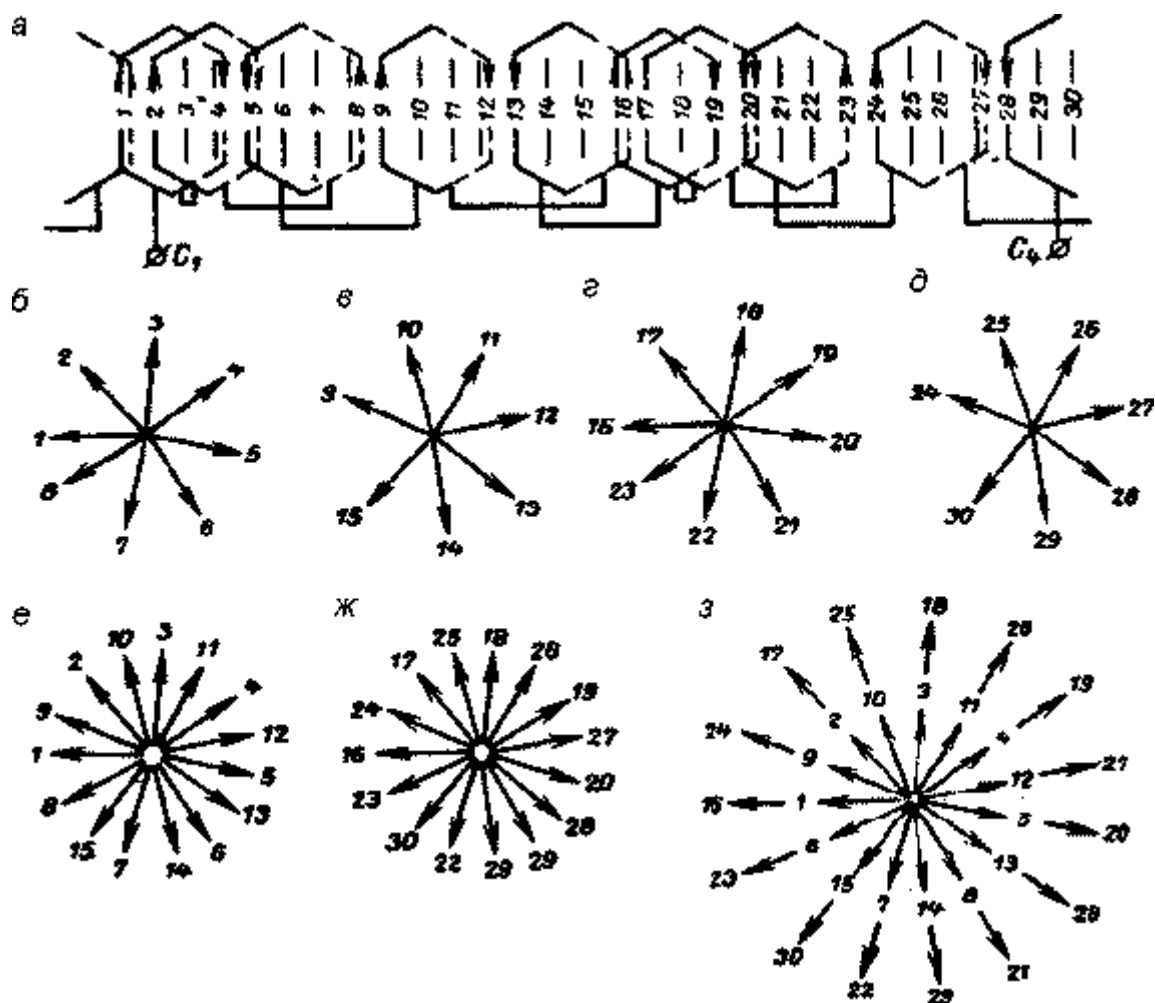


Рис. 2. 30. Трехфазная двухслойная петлевая обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу: $Z = 30$, $m = 3$, $2p = 8$, $q = 1\frac{1}{4}$, $y = 3$: а – схема фазы А; б – звезда пазовых эдс первой пары полюсов первого слоя; в – то же второй пары полюсов; г – то же третьей пары полюсов; д – то же четвертой пары полюсов; е – звезда пазовых эдс первой повторяющейся части одного слоя; ж – то же второй повторяющейся части; з – полная звезда пазовых эдс первого слоя.

2. 5. 6. Пример несимметричной трехфазной двенадцатиполусной двухслойной обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу.

Исходные данные:

– число пазов статора – $Z = 42$

– число фаз – $m = 3$

– число полюсов – $2p = 12$

Расчет обмотки:

– число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{42}{12 \times 3} = 1\frac{1}{6}$$

– полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{42}{12} = 3,5$$

– шаг обмотки $y = 3$. Обмотка с укороченным шагом $y < \tau$. Для построения таблицы распределения верхних катушечных сторон фаз в пазах статора представим число пазов на полюс и фазу q в виде дроби:

$$q = b + \frac{c}{d}$$

и преобразим ее в неправильную дробь:

$$q = \frac{N}{d}$$

где: $b = 1, c = 1, d = 6, N = b \times d + 1 = 7$. Число полюсов $2p = 12$.

По этим данным и методике, представленной в подразд. 2. 5. 1, построим табл. 2. 7.

Таблица 2. 7. Распределение верхних катушечных сторон фаз в пазах статора.

Полюсы	Фазы											
	А				В				С			
1	1			2			3			4		
2			5			6			7			
3	8			9			10			11		
4			12			13			14			
5	15			16			17			18		
6			19			20			21			
7	22			23			24			25		
8			26			27			28			
9	29			30			31			32		
10			33			34			35			
11	36			37			38			39		
12			40			41			42			
$\underbrace{\hspace{10em}}_{A^-} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{B^-} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{C^-}$												

Нижние стороны катушек на схеме обмотки выполняются с учетом шага обмотки $y = 3$. Развернутая схема трехфазной двухслойной петлевой обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу соответственно по фазам А, В и С представлена на рис. 2. 31.

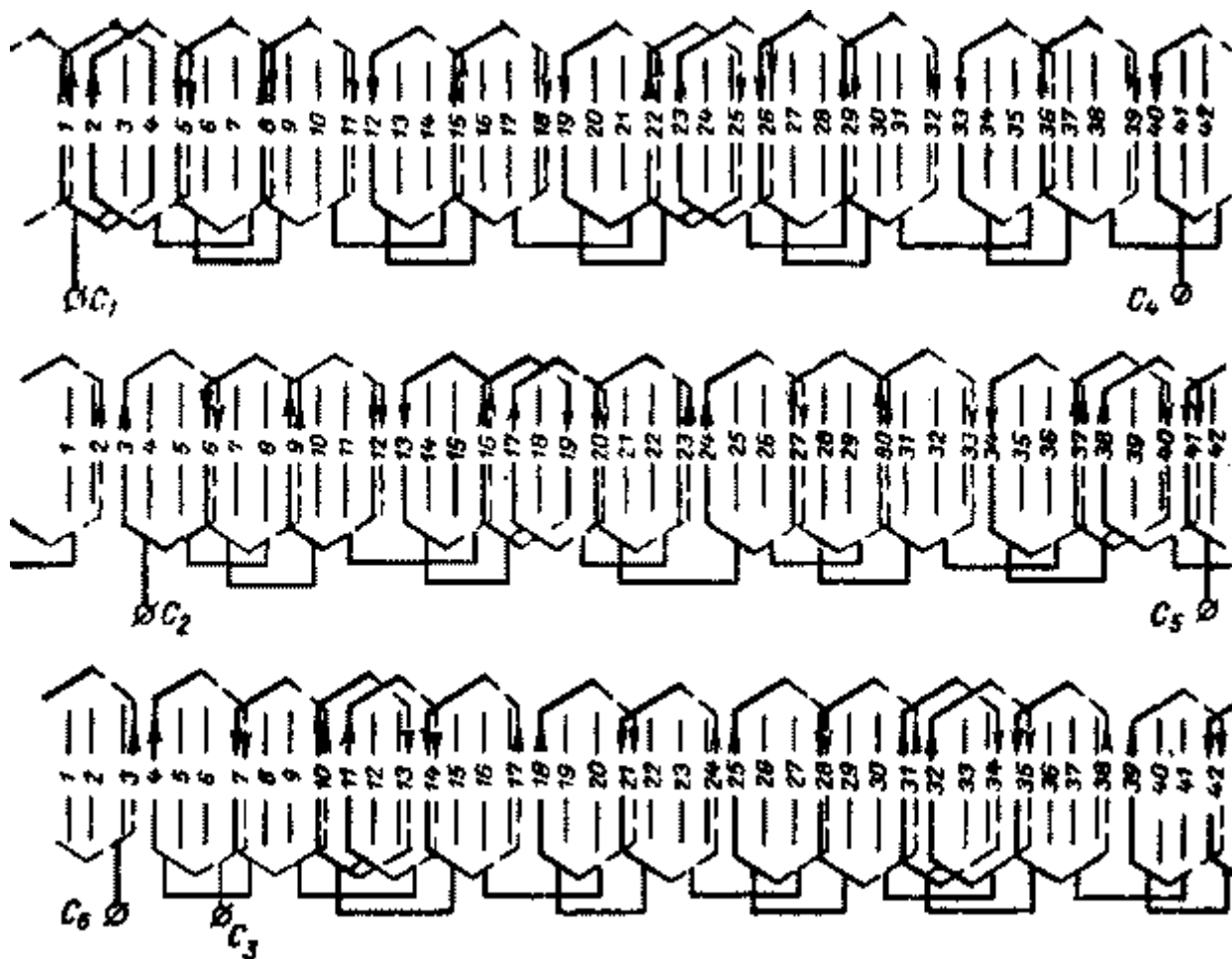


Рис. 2. 31. Развернутая схема трехфазной несимметричной двухслойной петлевой обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу: а – схема фазы А; б – схема фазы Б; в – схема фазы С, $Z = 42$, $m = 3$, $2p = 12$, $q = 1\frac{1}{6}$, $y = 3$, $\tau = 3,5$.

На рис. 2.32 приводятся соответствующие звезды пазовых эдс соответственно первой, второй, третьей, четвертой, пятой и шестой пары полюсов обмотки, а также полная звезда векторов пазовых эдс всей обмотки.

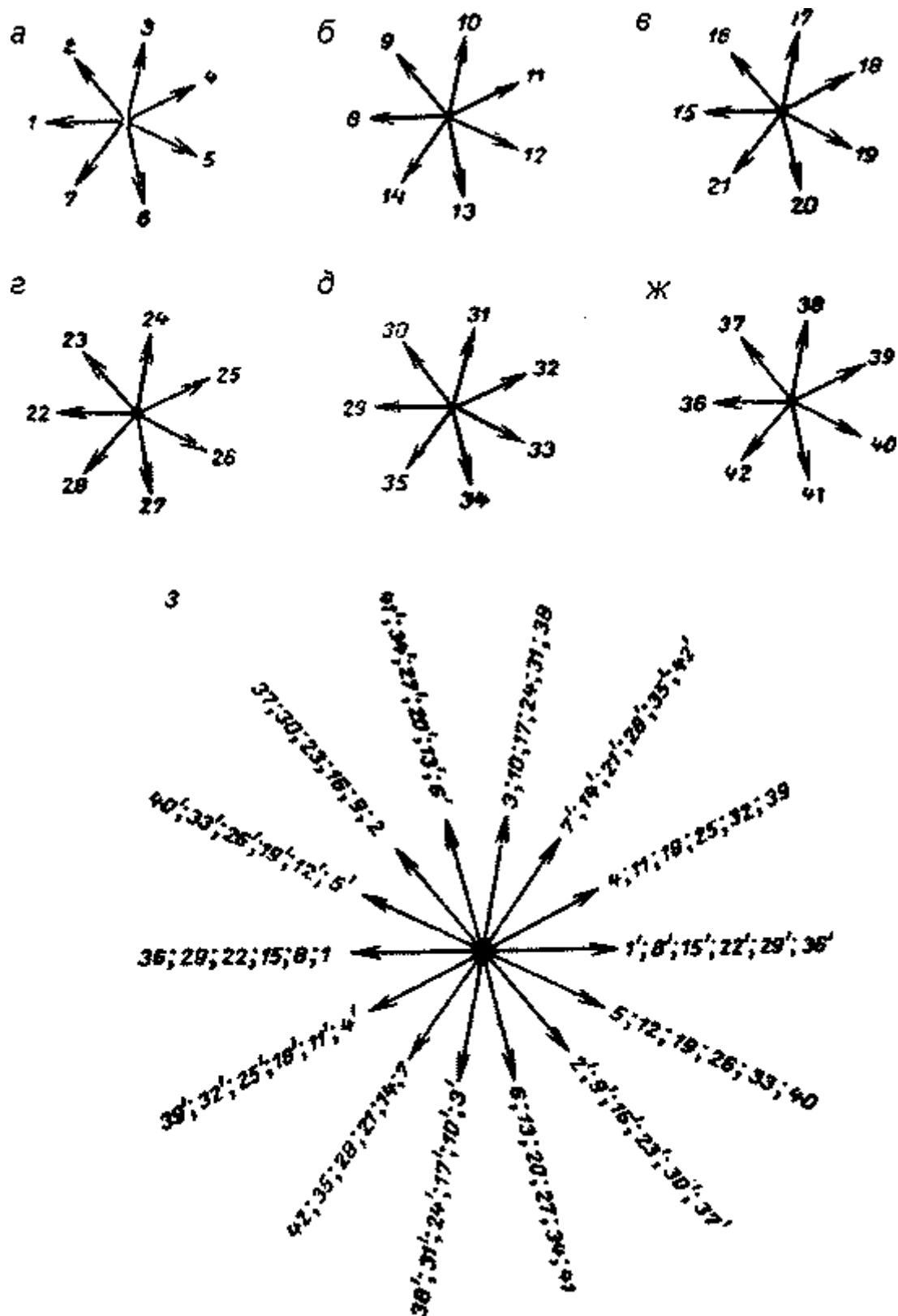


Рис. 2. 32. Звезда пазовых эдс трехфазной несимметричной двухслойной петлевой обмотки, а, б, в, г, д, ж – звезды векторов пазовых эдс соответственно 1, 2, 3, 4, 5 и 6-й пары полюсов; з – полная звезда векторов пазовых эдс всей обмотки $Z = 42$, $m = 3$, $2p = 12$, $q = 1\frac{1}{6}$, $y = 3$, $\tau = 3,5$.

2. 5. 7. Пример трехфазной четырехполюсной двухслойной волновой обмотки ротора с дробным числом пазов на полюс и фазу.

Исходные данные:

– число пазов статора – $Z = 30$

– число фаз – $m = 3$

– число полюсов – $2p = 4$

Расчет обмотки:

– число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{30}{4 \times 3} = 2\frac{1}{2}$$

– полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{30}{4} = 7,5$$

– шаг обмотки $y = 7$. Обмотка с укороченным шагом $y < \tau$;

– угол сдвига эдс соседних пазов:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{30} = 24^\circ \text{эл.}$$

– угол фазной зоны обмотки:

$$\alpha = q \times \gamma = 2\frac{1}{2} \times 24 = 60^\circ \text{эл.}$$

Обмотка с углом фазной зоны 60° (шестизонная) и соответственно с чередованием фазных зон А – Z – В – X – С – Y на каждую пару полюсов. По расчетным данным строится таблица 2.8 распределения верхних катушечных сторон фаз в пазах статора (табл. 2. 8).

Таблица 2. 8. Распределение верхних катушечных сторон в пазах ротора.

Полюс	Фаза														
	А					В					С				
1	29		30		1		2		3		4		5		6
2		7		8		9		10		11		12		13	
3	14		15		16		17		18		19		20		21
4		22		23		24		25		26		27		28	

На основании табл. 2. 8 строится развернутая схема фазы А трехфазной волновой обмотки (рис. 2. 33).

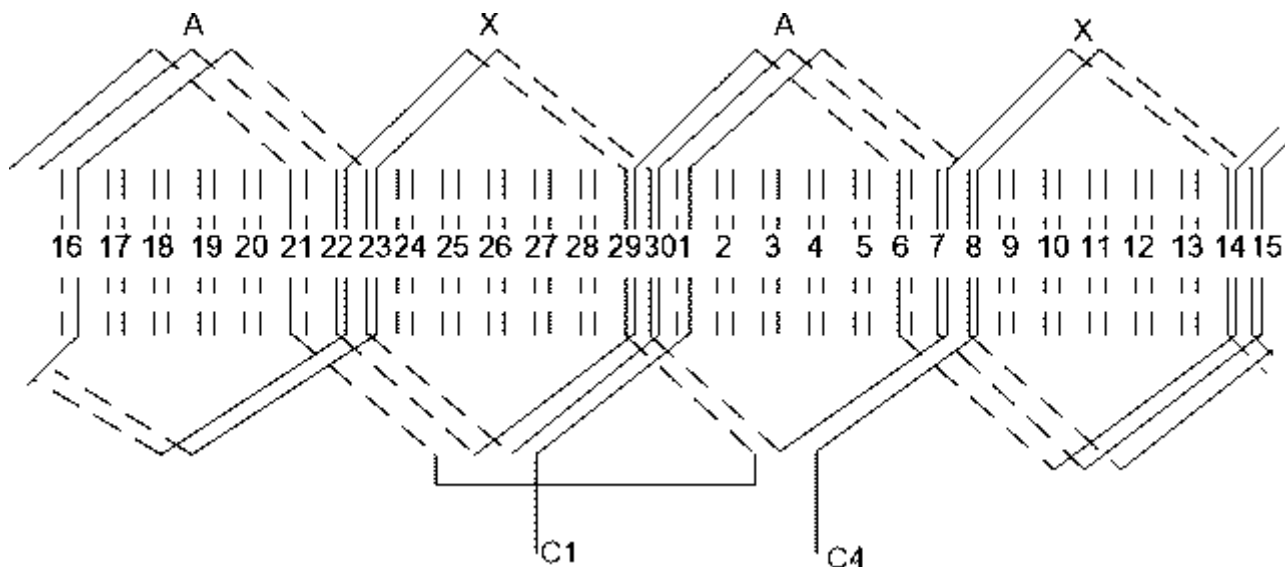


Рис. 2. 33. Развернутая схема фазы А трехфазной волновой обмотки (ротора) с дробным числом пазов на полюс и фазу: $Z = 30$, $m = 3$, $2p = 4$, $q = 2\frac{1}{2}$, $y = 7$.

2. 6. Трехфазные однослойные обмотки.

По конструкции однослойные трехфазные обмотки подразделяются на следующие типы: концентрические двухплоскостные или трехплоскостные; шаблонные; простые или шаблонные в развалку; цепные; эвольвентные и другие. Наиболее широко применяются на практике концентрические и шаблонные обмотки. Рассмотрим несколько примеров однослойных обмоток различных типов.

2. 6. 1. Пример трехфазной концентрической однослойной двухплоскостной обмотки.

Исходные данные

- число пазов – $Z = 24$
- число фаз – $m = 3$
- число полюсов – $2p = 4$

Расчет обмотки:

- число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{24}{4 \times 3} = 2$$

- полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

- шаг обмотки $y = \tau = 6$, однослойные обмотки не допускают укороченного шага (кроме цепных); – угол сдвига эдс соседних пазов статора:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{24} = 30^\circ \text{ эл.}$$

- угол фазной зоны обмотки:

$$\alpha = q \times \gamma = 2 \times 30 = 60^\circ \text{ эл.}$$

Таким образом, обмотка с углом фазной зоны $\alpha = 60^\circ$, и нормальное чередование фазных зон А – В – Х – С – У на пару полюсов. Особенностью однослойных обмоток является то, что катушечных групп в них в два раза меньше, чем в двухслойных. Это касается всех однослойных обмоток.

Кроме того, в концентрических обмотках вводится понятие среднего шага обмотки. Так, расчетный шаг обмотки y называют средним шагом; если $q = 2$ он определяется выражением:

$$y = \frac{y_1 + y_2}{2}$$

если $q = 3$, то:

$$y = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}$$

и т. д. На рис. 2. 34 поясняется методика определения среднего шага и конструкции катушечных обмоток. Число катушек в катушечной группе равно числу пазов на полюс и фазу q .

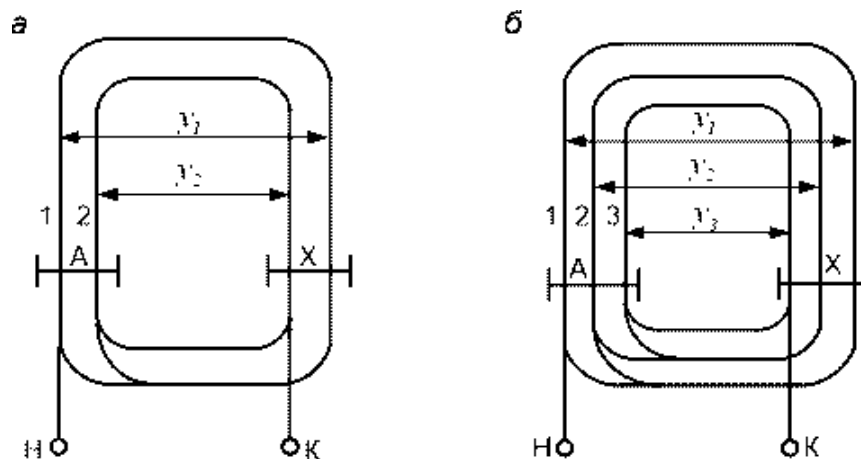


Рис. 2. 34. Катушечные группы концентрических обмоток: *a* – двухплоскостной обмотки; *б* – трехплоскостной обмотки.

Расчет обмотки позволяет построить звезду пазовых $\varepsilon\delta\varsigma$ и распределить пазы по фазным зонам. Эта звезда представлена на рис. 2. 35.

Особенностью однослойных обмоток является, то что одна катушечная группа в них одновременно выполняет сразу две фазные зоны. Одна сторона катушечной группы выполняет фазные зоны (А или В, или С в зависимости от фазы), а другие фазные зоны Х или Y, или Z, как показано на рис. 2. 35. В двухслойных же обмотках существуют целые катушечные группы соответствующих фазных зон.

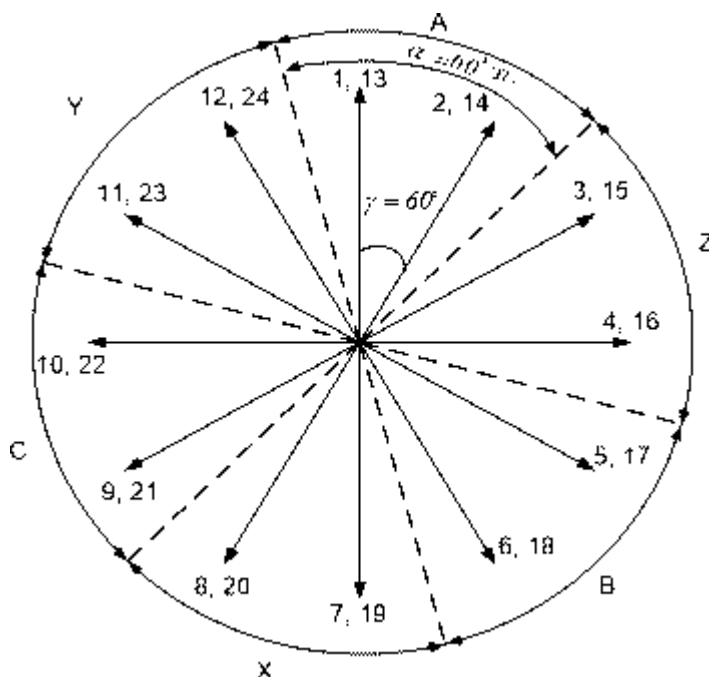


Рис. 2. 35. Звезда пазовых $\varepsilon\delta\varsigma$ и распределение пазов по фазным зонам.

В настоящем примере шаги y_1 и y_2 и составляющие средний шаг обмотки $y = \tau = 6$ будут: $y_1 = 7, y_2 = 5$. В соответствии со звездой пазовых эдс и распределения пазов по фазным зонам и шагам y_1 и y_2 и строится развернутая схема трехфазной двухплоскостной обмотки. Схема представлена на рис. 2. 36.

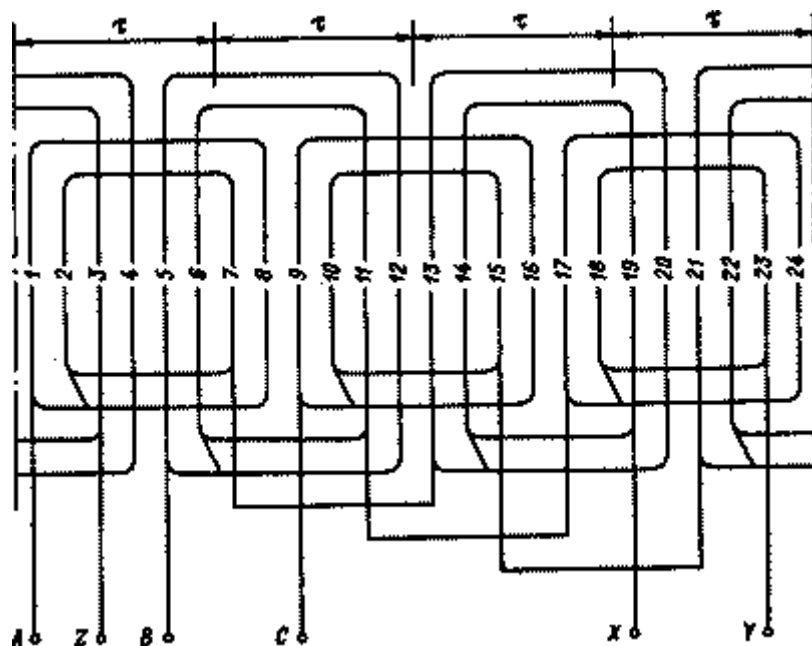


Рис. 2. 36. Схема трехфазной двухплоскостной concentрической обмотки:
 $Z = 24, m = 3, 2p = 4, q = 2, y = 6, y_1 = 7, y_2 = 5, \tau = 6$.

В concentрических двухплоскостных обмотках (рис. 2. 36). указывается два типа катушек по размерам: малые (короткие) и большие (длинные). Это делается для того, чтобы упростить пересечение и укладку лобовых частей катушек. Для пояснения этого на рис. 2. 37 показаны варианты выполнения лобовых частей катушек обмотки.

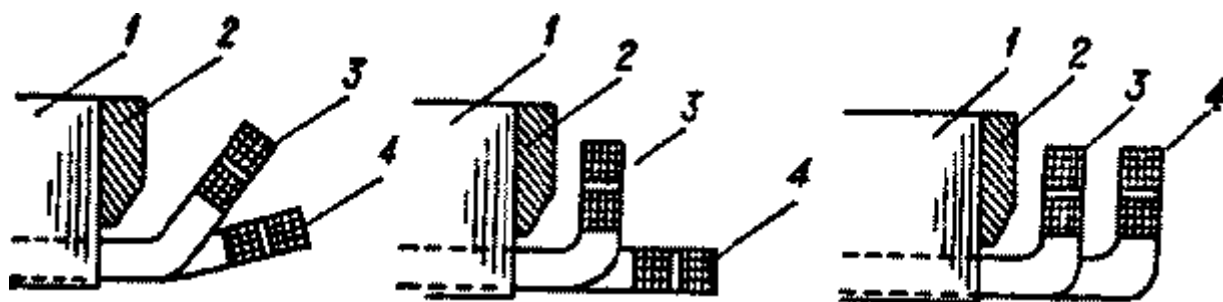


Рис. 2. 37. Расположение лобовых частей катушек двухплоскостной concentрической обмотки ($q = 2$): 1 – сердечник якоря; 2 – нажимная плита сердечника; 3 – короткие; 4 – длинные катушечные группы.

2. 6. 2. Пример трехфазной четырехполюсной трехплоскостной однослойной concentрической обмотки.

Исходные данные и расчет обмотки такой же, что и для предыдущего примера двухплоскостной обмотки (подразд. 2. 6. 1). Звезда пазовых эдс и распределение пазов по фазным зонам показаны на рис. 2. 35. Особенностью трехплоскостных concentрических обмоток является выполнение катушечных групп трех различных размеров: малые (короткие), средние и большие (длинные).

Схема трехфазной трехплоскостной концентрической обмотки показана на рис. 2. 38. Причем схема выполнена для разъемного статора, которая применяется для линейных или дуговых асинхронных двигателей, а также крупных синхронных и асинхронных машин, которые имеют статор, составленный из нескольких частей. На рис. 2. 39. показано расположение лобовых частей трехплоскостной концентрической обмотки.

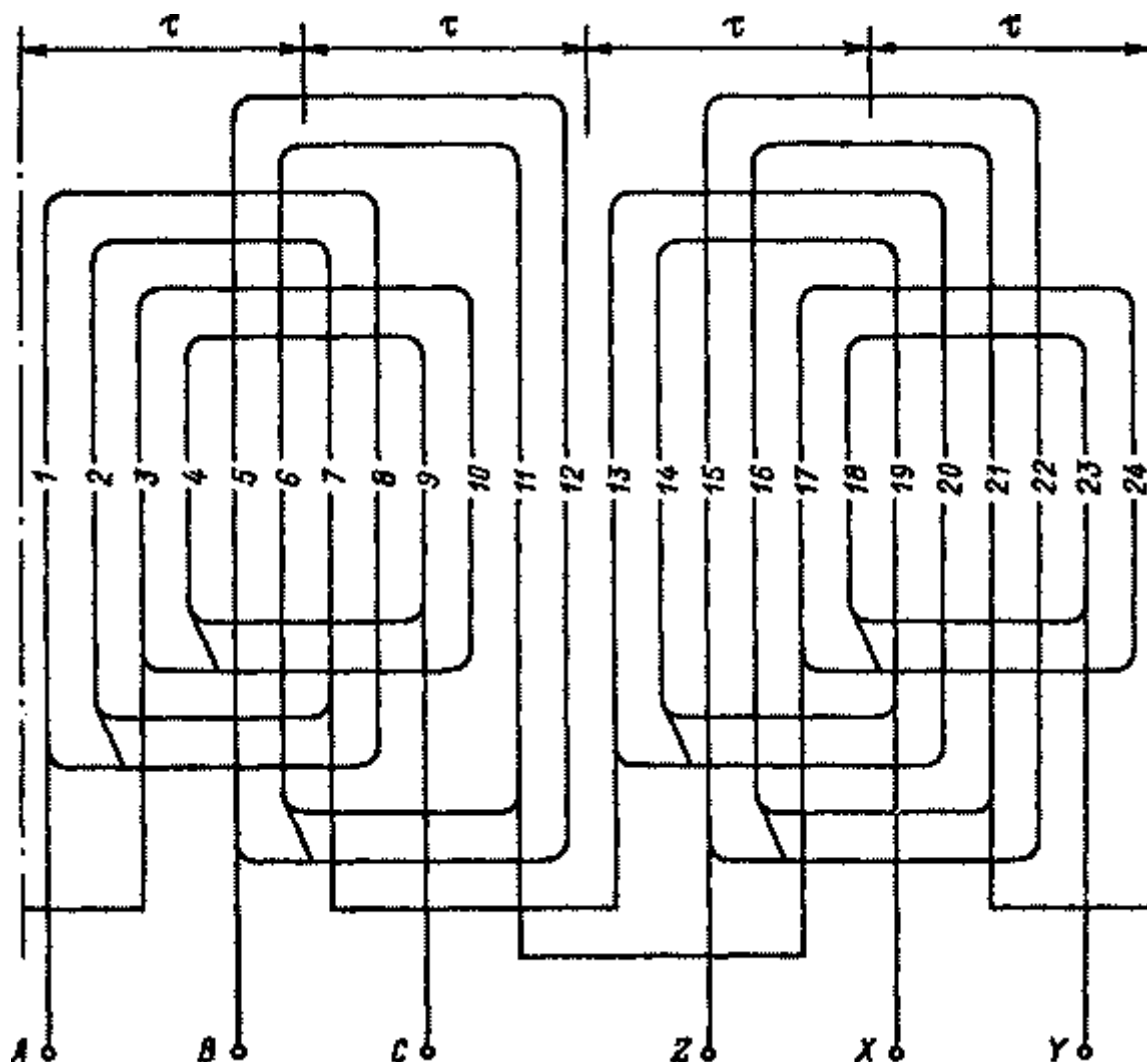


Рис. 2. 38. Схема трехфазной трехплоскостной концентрической обмотки для разъемного статора с $Z = 24$, $m = 3$, $2p = 4$, $q = 2$, $y = 6$, $y_1 = 7$, $y_2 = 5$, $\tau = 6$, $\alpha = 60^\circ$.

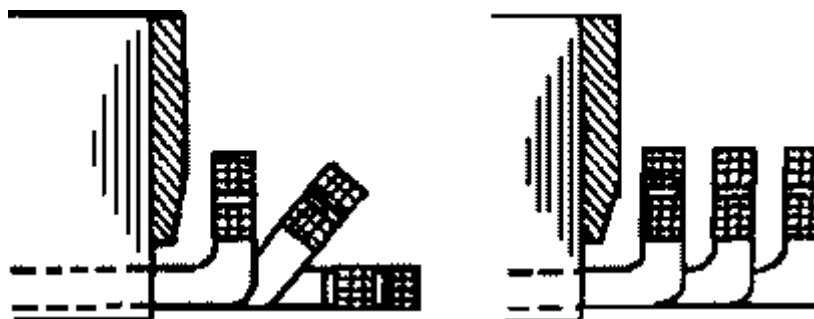


Рис. 2. 39. Расположение лобовых частей трехплоскостной концентрической обмотки

2. 6. 3. Пример трехфазной двухполюсной трехплоскостной однослойной concentric обмотки.

Исходные данные

– число пазов статора – $Z = 24$

– число фаз – $m = 3$

– число полюсов – $2p = 2$

Расчет обмотки:

– число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{24}{2 \times 3} = 4$$

– полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{2} = 12$$

– шаг обмотки $y = \tau = 12$;

– угол сдвига эдс соседних пазов статора:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{1 \times 360^\circ}{24} = 15^\circ \text{ эл.}$$

– угол фазной зоны обмотки:

$$\alpha = q \times \gamma = 4 \times 15 = 60^\circ \text{ эл.}$$

Таким образом, обмотка с углом фазной зоны $\alpha = 60^\circ$ и чередованием фазных зон А – Z – В – X – С – Y на пару полюсов. Звезда пазовых эдс и распределение пазов по фазным зонам представлено на рис. 2. 40.

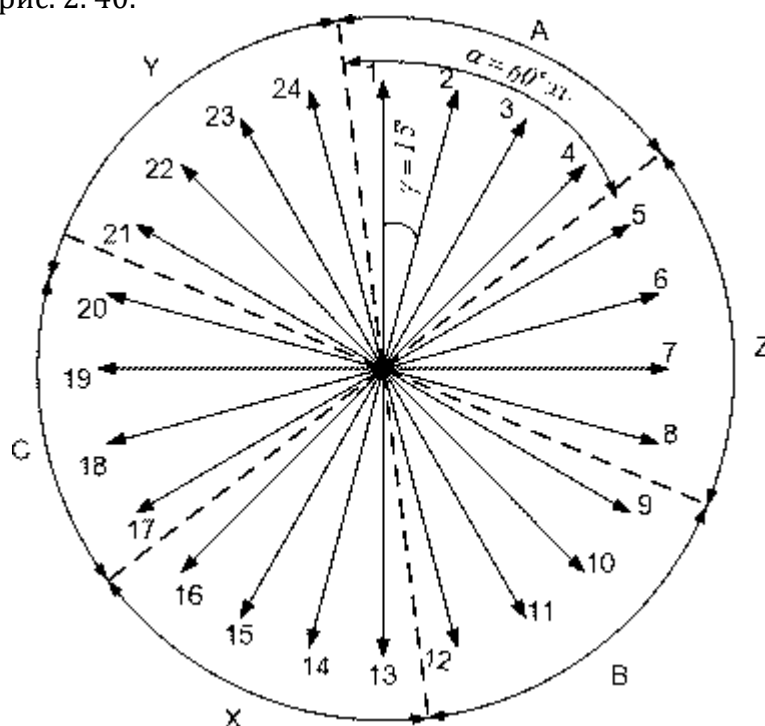


Рис. 2. 40. Звезда пазовых эдс и распределение пазов по фазным зонам
Согласно звезде пазовых эдс строится развернутая схема обмотки,
которая показана на рис. 2. 41.

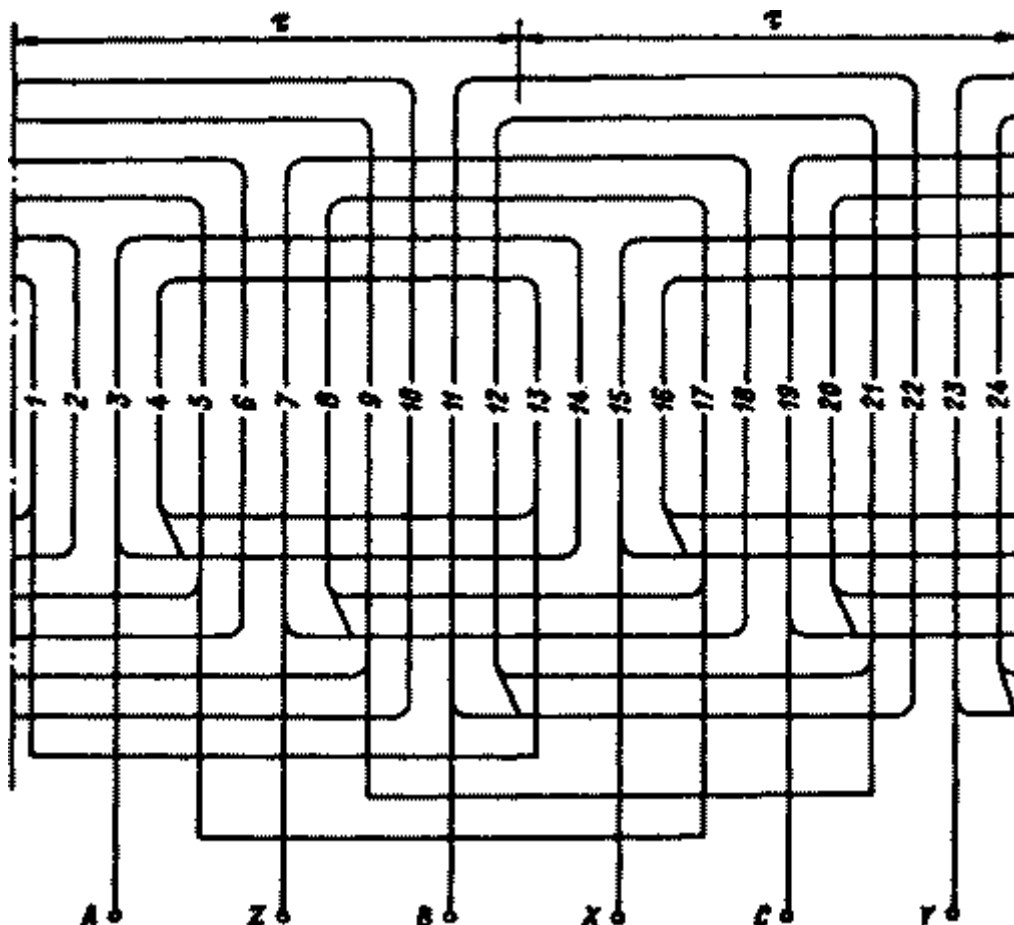


Рис. 2. 41. Схема трехфазной трехплоскостной концентрической обмотки
 $Z = 24, m = 3, 2p = 2, q = 4, y = 12, \tau = 12$.

На схеме видно, что катушечная группа из четырех катушек, которые в свою очередь разделены на две отдельные катушечные группы.

2. 6. 4. Пример трехфазной четырехплоскостной простой шаблонной однослойной обмотки.

Исходные данные

- число пазов статора – $Z = 24$
- число фаз – $m = 3$
- число полюсов – $2p = 4$

Расчет обмотки и звезда пазовых ЭДС соответствует данным, представленным в подразд. 2. 6. 1. Особенностью шаблонной обмотки является то, что катушки и катушечные группы обмоток во всех фазах совершенно одинаковые. Это позволяет их выполнить на шаблонах. Схема простой шаблонной обмотки, соответствующая исходным данным и расчету, показана на рис. 2. 42.

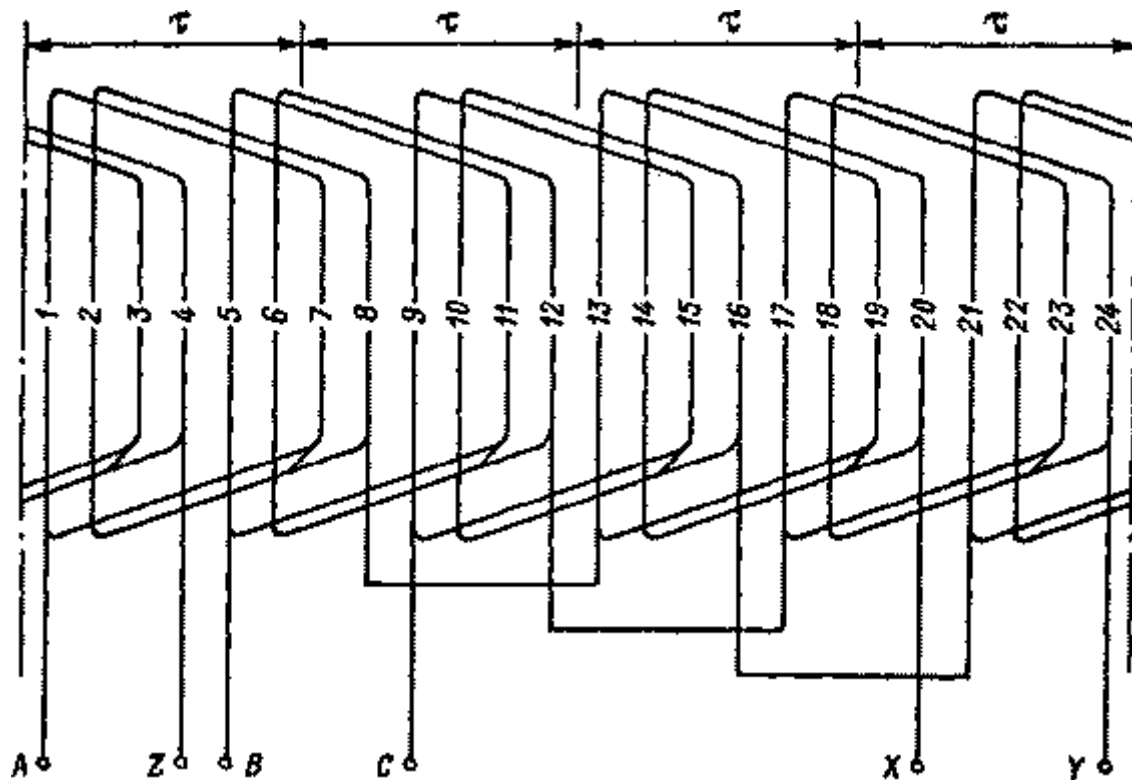


Рис. 2. 42. Схема трехфазной простой шаблонной обмотки:
 $Z = 24, m = 3, 2p = 4, q = 2, y = 6, \tau = 6, \alpha = 60^\circ$.

2. 6. 5. Пример трехфазной двухполюсной однослойной шаблонной обмотки "в развалку".

Исходные данные

- число пазов статора - $Z = 24$
- число фаз - $m = 3$
- число полюсов - $2p = 2$.

Расчет обмотки и звезда пазовых эдс с распределением пазов по фазным зонам, представленным в подразд. 2. 6. 3.

Схема шаблонной обмотки "в развалку" показана на рис. 2. 43.

Пример катушки шаблонных обмоток показан на рис. 2. 44.

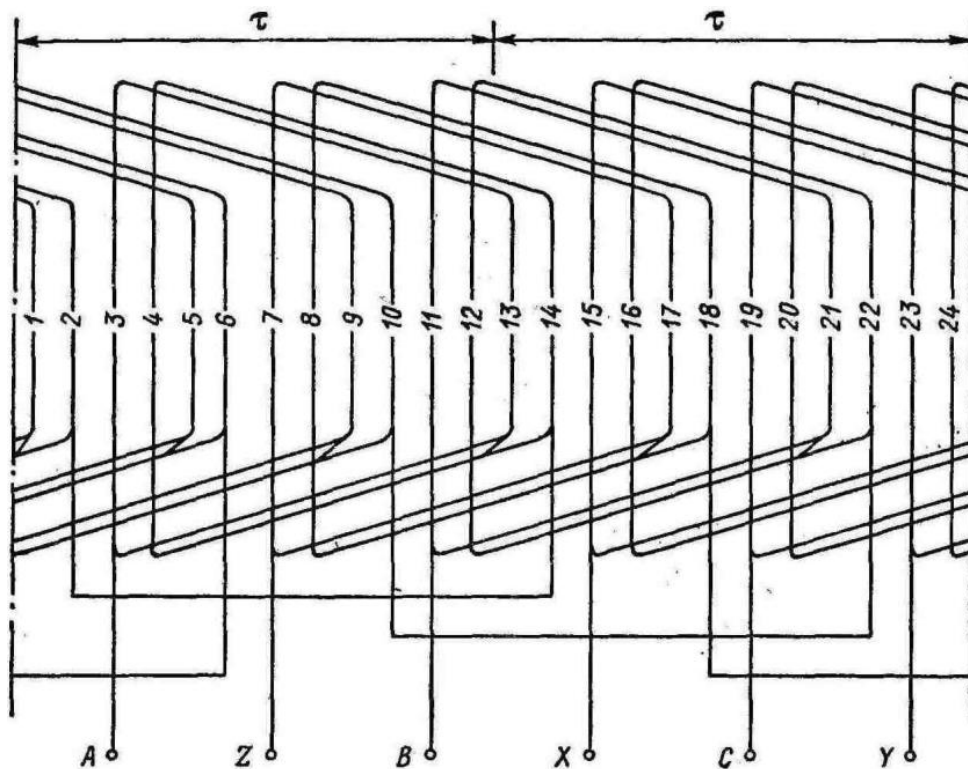


Рис. 2. 43. Схема трехфазной шаблонной обмотки "в развалку":
 $Z = 24, m = 3, 2p = 2, q = 2, y = 12, \tau = 12, \alpha = 60^\circ$.

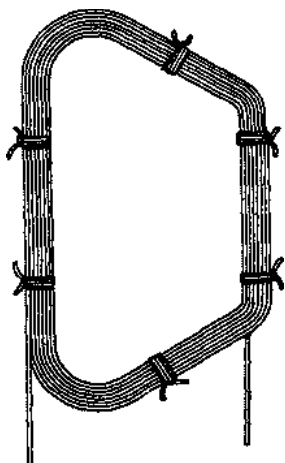


Рис. 2. 44. Катушка шаблонной обмотки.

Шаблонные обмотки широко применяются в машинах переменного тока малой мощности (до 7 – 10 кВт), в которых используется круглый обмоточный провод.

2. 6. 6. Пример трехфазной однослойной двухполюсной цепной обмотки.

Исходные данные:

– число пазов – $Z = 24$

– число фаз – $m = 3$

– число полюсов – $2p = 2$. Расчет обмотки:

– число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{24}{2 \times 3} = 4$$

– полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{2} = 12$$

– шаг обмотки y . Цепная обмотка, единственная из однослойных, которая допускает укорочения шага. Принимаем $y = 9$, тогда:

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{9}{12} = \frac{3}{4}$$

– угол сдвига эдс соседних пазов статора:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{1 \times 360^\circ}{24} = 15^\circ \text{ эл.}$$

– угол фазной зоны обмотки:

$$\alpha = q \times \gamma = 4 \times 15 = 60^\circ \text{ эл.}$$

Таким образом, обмотка с углом фазной зоны $\alpha = 60^\circ$ и чередованием фазных зон А – Z – В – X – С – Y на пару полюсов. На основании расчетных данных строится звезда пазовых эдс и распределение пазов по фазным зонам (рис. 2. 45).

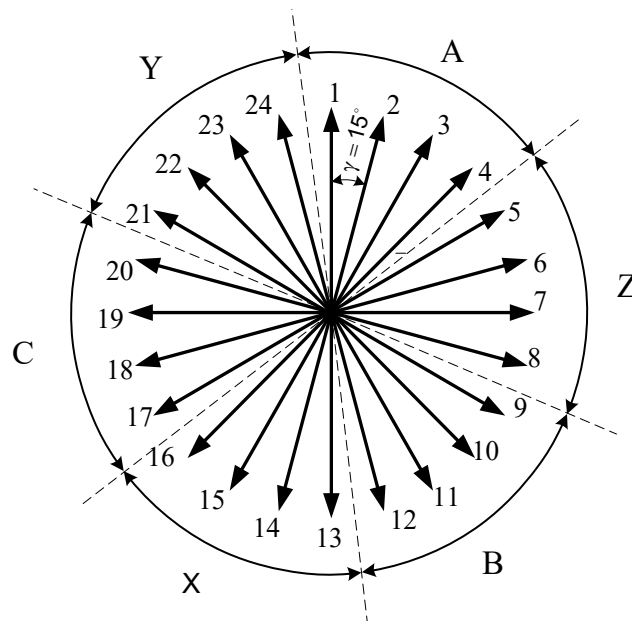


Рис. 2. 45. Звезда пазовых эдс и распределение пазов по фазным зонам:
 $Z = 24, m = 3, 2p = 2, q = 4, \alpha = 60^\circ, \gamma = 15^\circ$.

На основании расчетов и звезды пазовых эдс строится развернутая схема обмотки, которая представлена на рис. 2. 46.

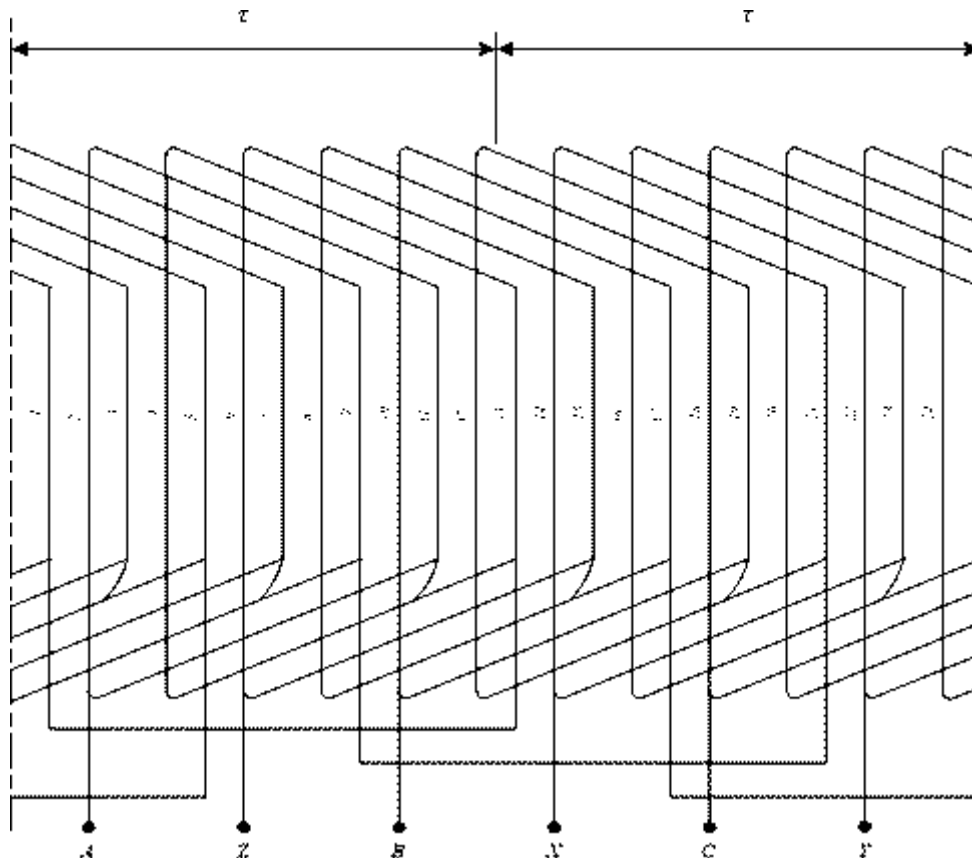


Рис. 2. 46. Схема трехфазной однослойной двухполюсной цепной обмотки:
 $Z = 24, m = 3, 2p = 2, q = 4, y = 9$.

2. 6. 7. Пример двухфазной петлевой двухслойной четырехполюсной обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с укороченным шагом.

Исходные данные:

- число пазов - $Z = 16$
- число фаз - $m = 2$
- число полюсов - $2p = 4$

Расчет обмотки:

- число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{16}{4 \times 2} = 2$$

- полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{16}{4} = 4$$

- шаг обмотки y . Принимаем укороченный шаг $y = 3$, относительный шаг обмотки:

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{3}{4}$$

- угол сдвига ε соседних пазов статора:

$$\gamma = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{16} = 45^\circ \text{ эл.}$$

- угол фазной зоны обмотки:

$$\alpha = q \times \gamma = 4 \times 45 = 90^\circ$$

В двухфазной обмотке фазы сдвинуты в пространстве на 90° . По расчетным данным q, γ, α , строится звезда пазовых эдс и распределяются пазы по фазным зонам (рис. 2. 47).

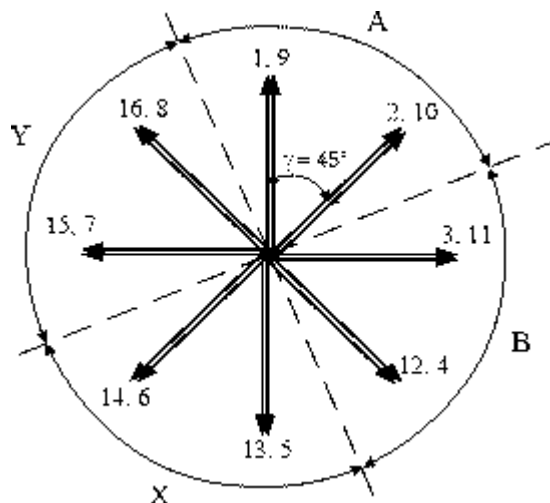


Рис. 2. 47. Звезда пазовых эдс и распределение пазов по фазным зонам:
 $Z = 16, m = 2, q = 2, \alpha = 90^\circ, \gamma = 45^\circ$.

На основании расчетов и звезды пазовых эдс строится развернутая схема обмотки, которая представлена на рис. 2. 48.

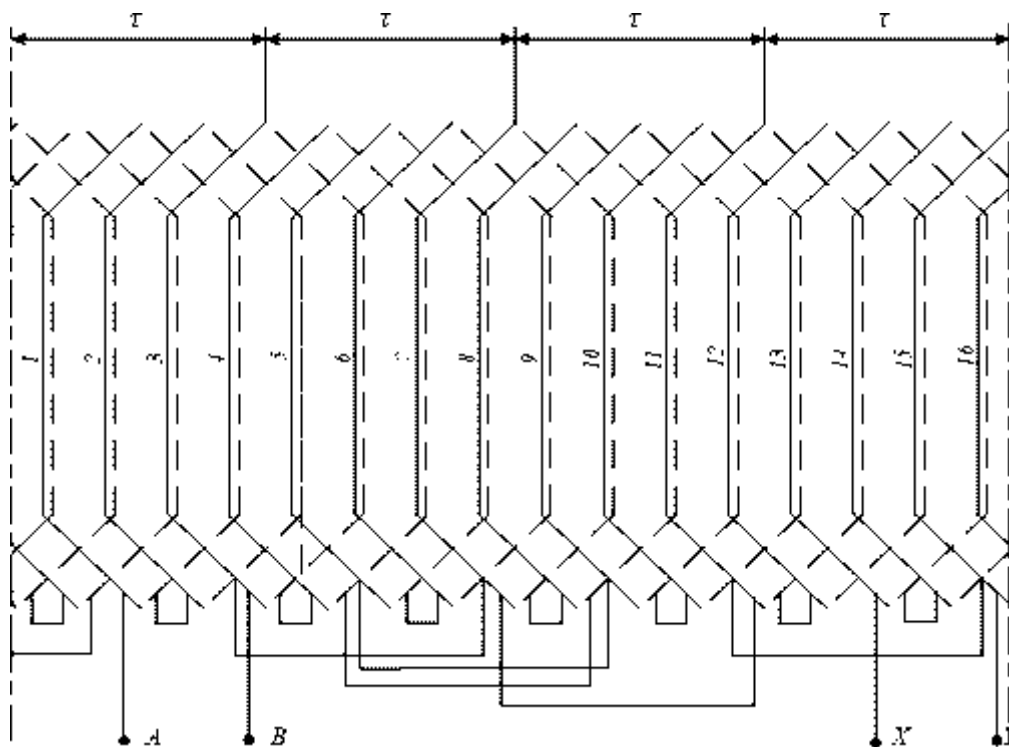


Рис. 2. 48. Схема двухфазной петлевой двухслойной обмотки с укороченным шагом:
 $Z = 16, m = 2, q = 2, \gamma = 3, \tau = 4, \beta = \frac{3}{4}$.

Контрольные вопросы.

1. Типы обмоток электрических машин переменного тока. Классификация обмоток.
2. Поясните устройство трехфазных двухслойных петлевых обмоток.
3. Устройство двухслойных волновых обмоток.
4. Методика расчета обмоток статора машин переменного тока.
5. Звезда пазовых эдс. Методика ее построения. Распределение пазов по фазным зонам.

6. Правила соединения катушечных групп в фазе различных фазных зон в двухслойных обмотках.
7. Правила выполнения развернутых схем трехфазных петлевых обмоток с целым числом пазов на полюс и фазу.
8. Двухслойные обмотки с дробным числом на полюс и фазу. Особенности их конструкции и расчета.
9. Методика расчета двухслойных обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу.
10. Правила построения таблицы размещения верхних сторон катушечных групп в пазах статора обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу.
11. Методика построения развернутых схем обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу по таблице распределения верхних сторон катушечных групп в пазах статора.
12. Типы однослойных обмоток статора машин переменного тока.
13. Устройство, расчет и методика построения трехфазной однослойной концентрической двухплоскостной обмотки.
14. Устройство, расчет и методика построения трехфазной однослойной концентрической трехплоскостной обмотки.
15. Устройство, методика расчета и построения развернутой схемы трехфазной шаблонной обмотки.
16. Цепная трехфазная однослойная обмотка.
17. Двухфазная двухслойная петлевая обмотка. Методика расчета, звезда пазовых эдс, развернутая схема.
18. Шаг обмотки переменного тока.
19. Угол фазной зоны обмотки переменного тока.

Рекомендуемая литература: [1, 2, 3, 5–8, 13, 16, 17].

3. Обмотки статора многоскоростных асинхронных короткозамкнутых двигателей.

3. 1. Общие сведения о регулировании частоты вращения асинхронных двигателей изменением числа пар полюсов.

Этот способ регулирования применяется обычно для двигателей асинхронных с короткозамкнутым ротором, так как при этом необходимо изменять p только обмотки статора. Изменять число пар полюсов p можно двумя способами:

- применением на статоре нескольких обмоток, которые уложены в общие пазы и имеют различные числа пар полюсов p ;
- применением на статоре обмотки специального типа, которая позволяет получить различное число p за счет изменения схемы соединений обмотки. Предложено большое количество различных схем обмоток с переключением p , но практическое применение получили только некоторые из них.

Двигатели с изменением числа пар полюсов называются многоскоростными. Обычно они выпускаются на 2, 3 и 4 частоты вращения.

Многоскоростные двигатели применяются в металлорежущих, деревообрабатывающих станках в грузовых и пассажирских лифтах, для приводов вентиляторов, кондиционеров, насосов и в других электроприводах переменного тока.

Рассмотрим несколько примеров многоскоростных обмоток статора с переключением числа пар полюсов. Эти двигатели относятся к серии Т.

3. 2. Схемы обмоток статора двухскоростных асинхронных двигателей.

Для примера на рис. 3. 1. показана торцевая схема соединения трехфазной двухскоростной обмотки статора с числом полюсов $2p = 6/4$ и число пазов статора $Z = 36$. Тип обмотки концентрическая с $q = 3$. Данные обмотки на разное число полюсов поясняет рис. 3. 1.

На рис. 3. 2 показана развернутая схема трехфазной петлевой обмотки с переключением числа полюсов с 4 на 2. На том же рисунке представлены схемы выводов и подключение их к сети.

На рис. 3. 3 представлена схема обмотки статора двухскоростного двигателя с переключением числа полюсов с 6 на 2. Там же приведены схемы соединения выводов обмотки и подключения их к сети.

На рис. 3. 4 приводится развернутая обмотка статора двухскоростного двигателя с переключением числа полюсов с 8 на 2, а также представлены схемы соединения выводов и подключение их к сети при различном числе полюсов

На рис. 3.5 показана трехфазная развернутая схема обмотки статора двухскоростного двигателя с переключением числа полюсов с 8 на 6.

Вышеизложенные варианты схем двухскоростных двигателей на статоре имеют одну переключаемую обмотку.

На рис. 3.6 на статоре выполняется две отдельно переключаемые обмотки, которые в целом позволяют переключить число полюсов с 12 на 2.

На рис. 3.7 приведена схема двухскоростного двигателя с двумя переключаемыми обмотками с числа полюсов 16 на 2.

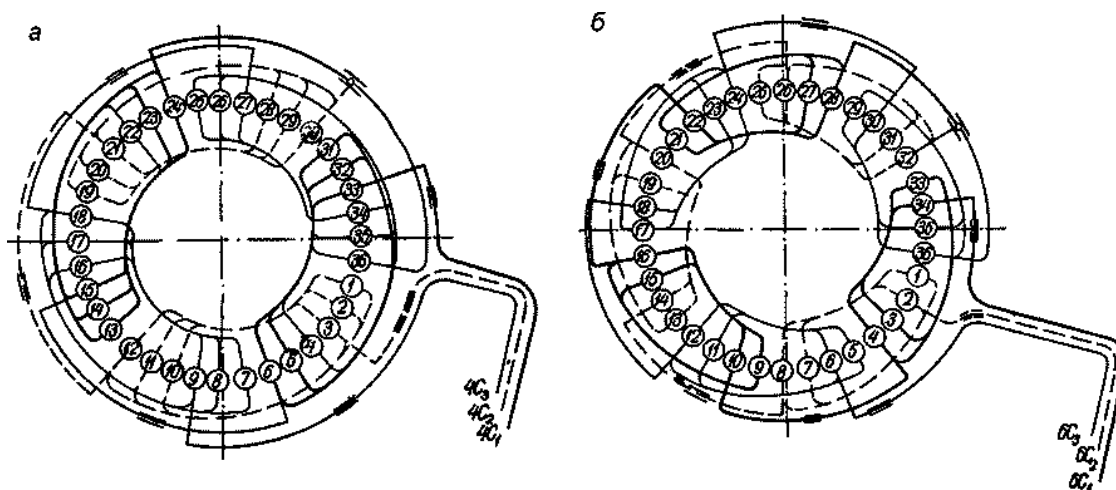


Рис. 3. 1. Схемы соединения обмотки $2p = 6/4$, $Z = 36$, $2p = 4$,
а – катушечная группа из трех катушек соответственно с шагом 1 – 12, 2 – 11, 3 – 10;
б – $2p = 6$, катушечная группа из двух катушек соответственно с шагом 1 – 8, 2 – 7.

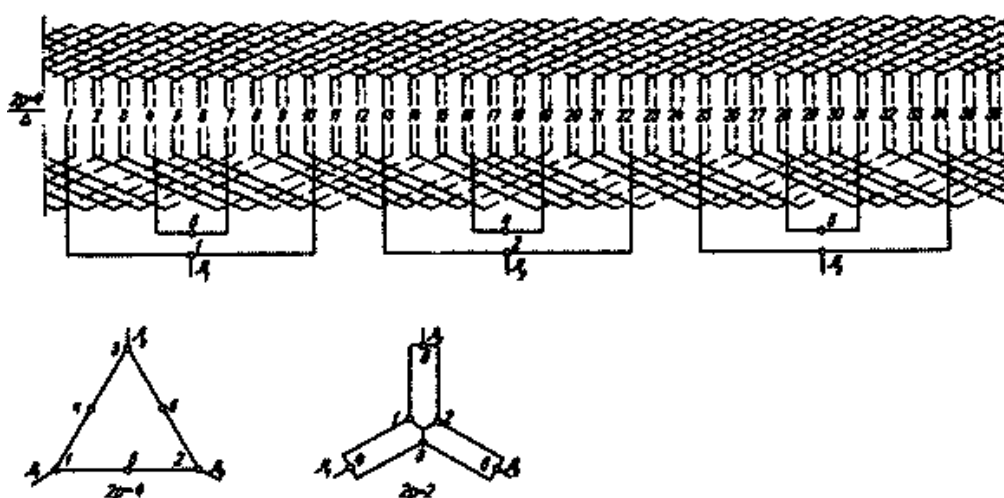


Рис. 3. 2. Схема $C2/4 - 2$. Число выводов обмотки статора – 6.

Соединение выводов и подключение к сети:

$2p = 4\Delta$ $L_1 - 1$; $L_2 - 2$; $L_3 - 3$; $2p = 2Y$ $L_1 - 4$; $L_2 - 5$, 1 – 2 – 3; $L_3 - 6$; свободны: 4, 5, 6.

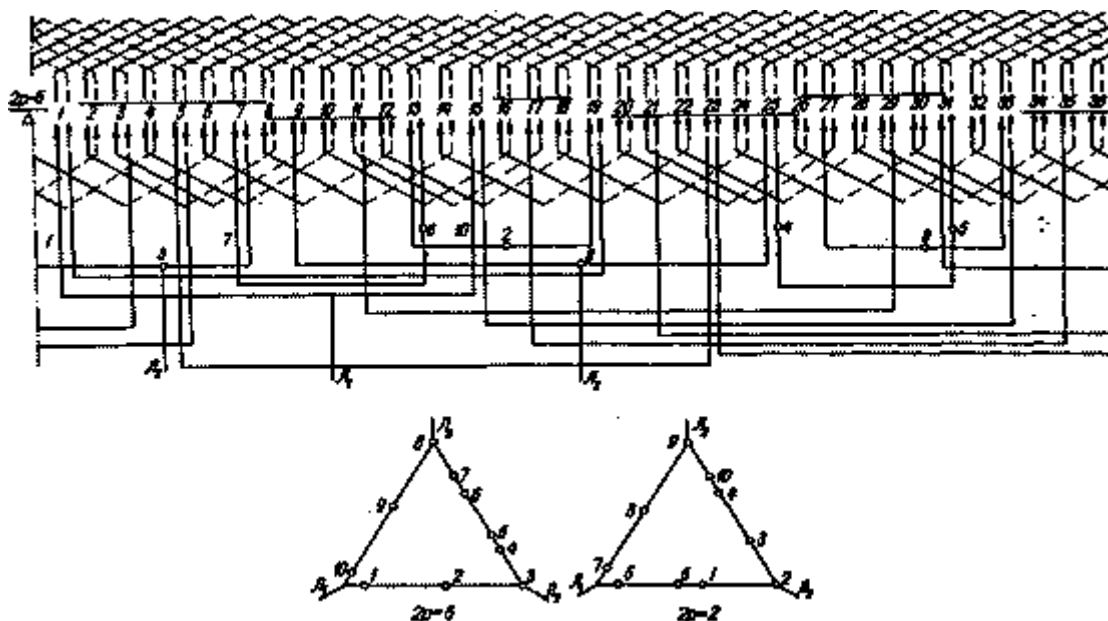


Рис. 3.3. Схема X2/6-2. Число выводов обмотки статора – 10.

Соединение выводов и подключение к сети:

$2p = 6\Delta$ $L_1 - 1-10$; $L_2 - 3, 4-5, 6-7$; $L_3 - 8$; свободны: 2, 9.

$2p = 2\Delta$ $L_1 - 5-7, 6-1$; $L_2 - 2, 4-10$; $L_3 - 9$; свободны: 3, 8.

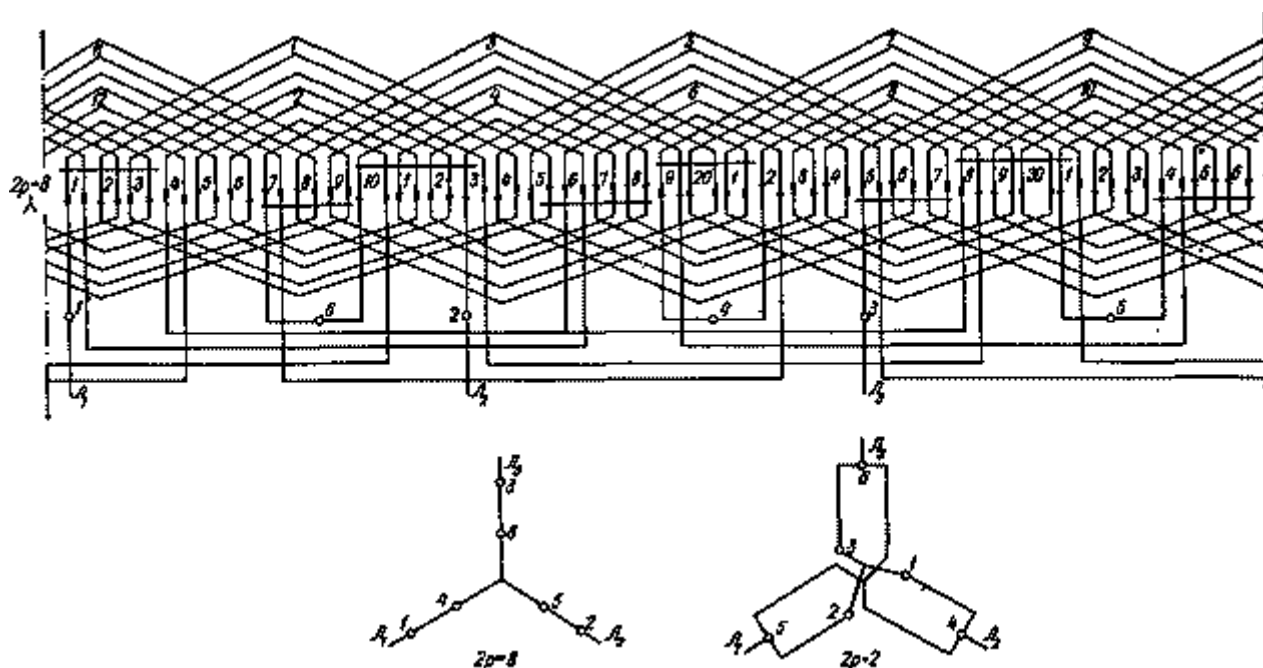


Рис. 3.4. Схема X1/8-2. Число выводов обмотки статора – 6.

Соединение выводов и подключение к сети:

$2p = 8Y$ $L_1 - 1$; $L_2 - 2$; $L_3 - 3$;

$2p = 2YY$ $L_1 - 5$; $L_2 - 1-2-3$; $L_3 - 6$;

свободны: 4, 5, 6.

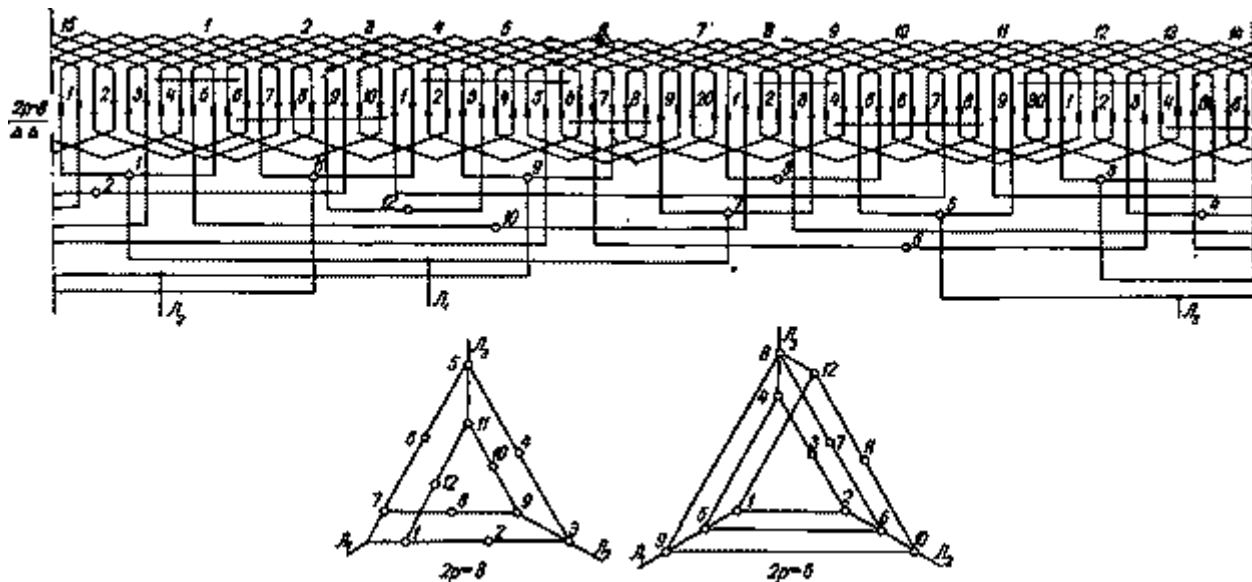


Рис. 3. 5. Схема X2/8-6. Число выводов обмотки статора – 12.

Соединение выводов и подключение к сети:

$2p = 8 \Delta \Delta$ $L_1 - 1-7$; $L_2 - 3-9$; $L_3 - 5-11$; свободны: 2, 4, 6, 8, 10, 12.

$2p = 2 \Delta \Delta \Delta$ $L_1 - 1-5-9$; $L_2 - 2-6-10$; $L_3 - 4-8-12$; свободны: 3, 7, 11.

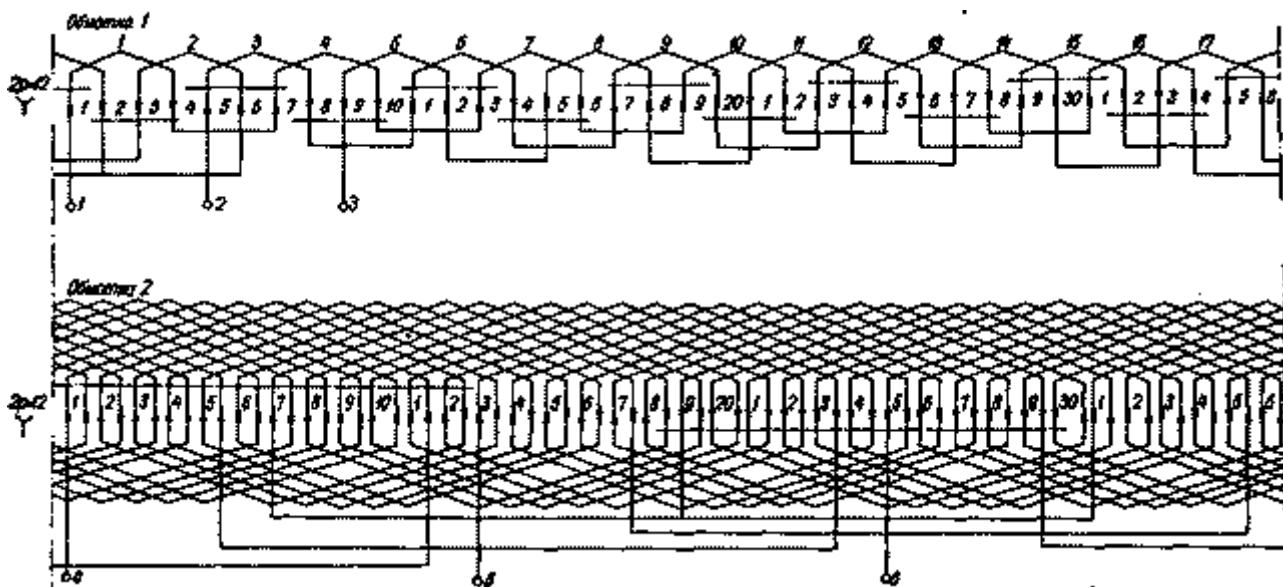


Рис. 3. 6. Схема C2/12-2. Число выводов обмотки статора – 6.

Соединение выводов и подключение к сети:

$2p = 12 Y$ $L_1 - 1$; $L_2 - 2$; $L_3 - 3$; свободны: 4, 5, 6.

$2p = 2 Y$ $L_1 - 4$; $L_2 - 5$; $L_3 - 6$; свободны: 1, 2, 3.

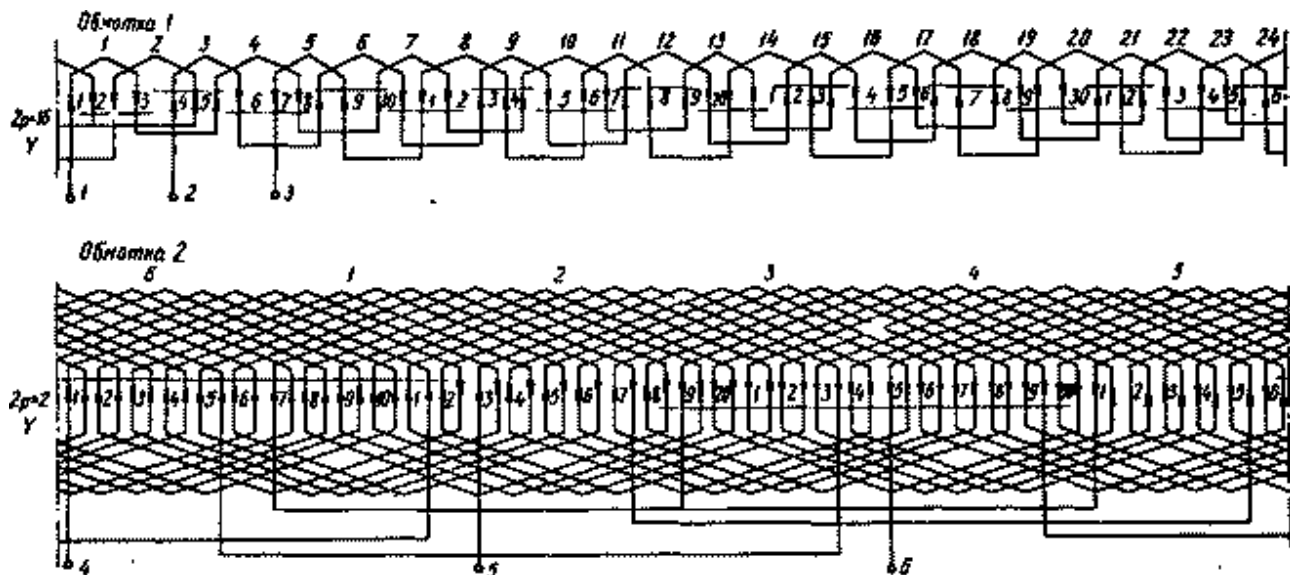


Рис. 3. 7. Схема C2/16-2. Число выводов обмотки статора – 6.

Соединение выводов и подключение к сети:

$2p = 16Y$ $L_1 - 1$; $L_2 - 2$; $L_3 - 3$; свободны: 4, 5, 6.

$2p = 2Y$ $L_1 - 4$; $L_2 - 5$; $L_3 - 6$; свободны: 1, 2, 3.

3. 3. Схемы обмоток статора трехскоростных асинхронных двигателей.

Без дополнительных пояснений на рис. 3. 8, 3. 9, 3. 10, 3. 11 и 3. 12 пять вариантов развернутых трехфазных схем статора трехскоростных асинхронных короткозамкнутых двигателей с различными вариантами переключения числа полюсов.

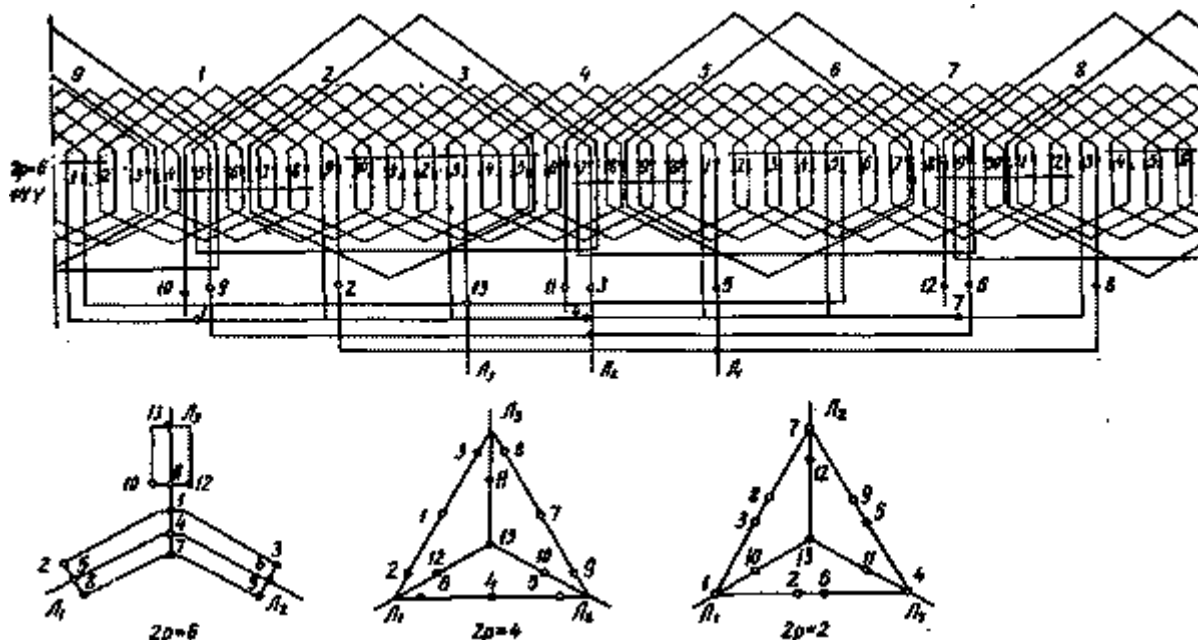


Рис. 3. 8. Схема X1/6-4-2. Число выводов обмотки статора – 13.

Соединение выводов и подключение к сети:

$2p = 6YYY$ $L_1 - 2-5-8$; $L_2 - 3-6-9$; $L_3 - 13, 1-4-7-10-11-12$.

$2p = 4\Delta$ $L_1 - 2-6-12$; $L_2 - 5-9-10$; $L_3 - 3-8-11$, свободно: 1, 4, 7, 13.

$2p = 2\Delta$ $L_1 - 1-10, 2-6$; $L_2 - 7-12, 8-3$; $L_3 - 4-11, 5-9$; свободны: 13.

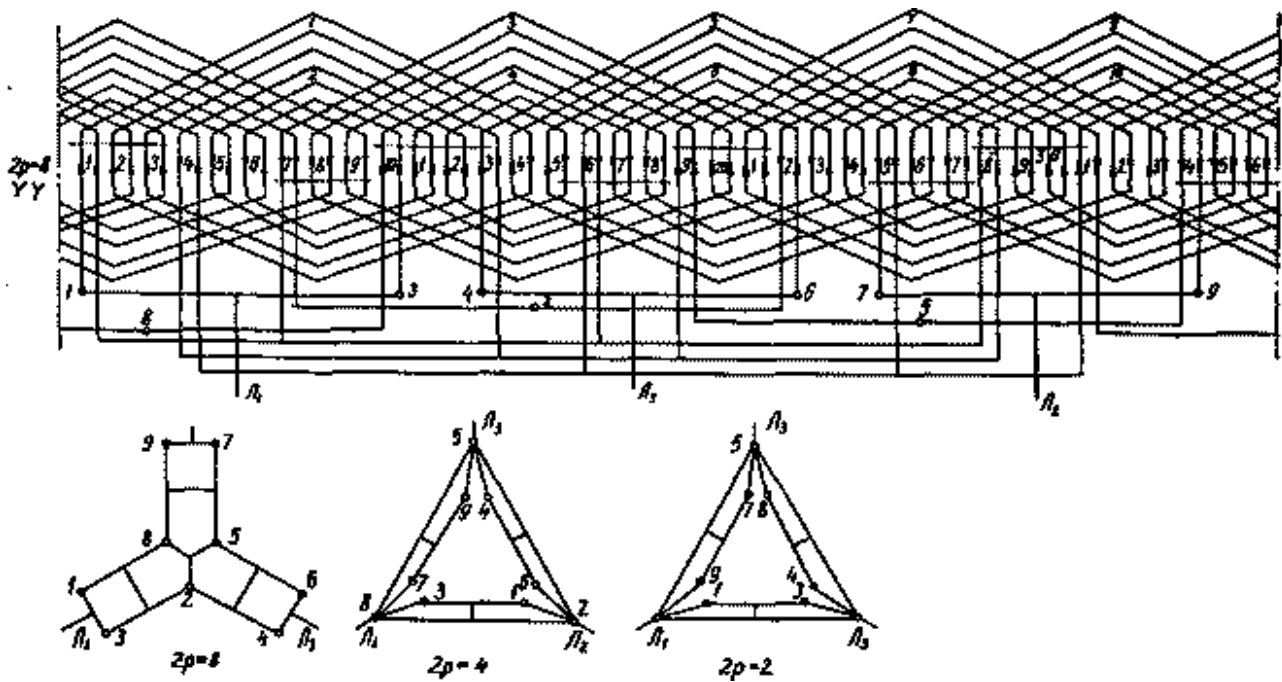


Рис. 3. 9. Схема X1/8-4-2. Число выводов обмотки статора – 9.

Соединение выводов и подключение к сети:

$2p = 8$ YY $L_1 - 1-3$; $L_2 - 7-9, 2-5-8$; $L_3 - 4-6$.

$2p = 4$ $\Delta\Delta$ $L_1 - 3-7-8$; $L_2 - 1-2-6$; $L_3 - 4-5-9$.

$2p = 2$ Δ $L_1 - 1-8-9$; $L_2 - 5-6-7$; $L_3 - 2-3-4$.

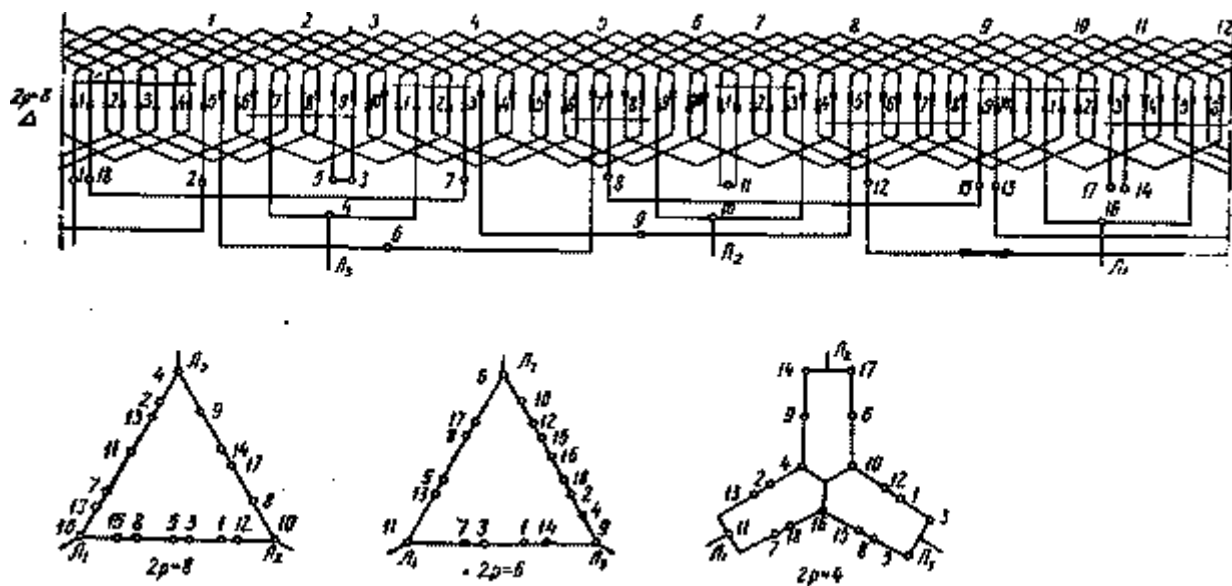


Рис. 3. 10. Схема X1/8-6-4. Число выводов обмотки статора – 13.

Соединение выводов и подключение к сети:

$2p = 8$ Δ $L_1 - 16, 18-7, 13-2$; $L_2 - 10, 12-1, 3-5, 8-12$; $L_3 - 4, 14-17$; свободны: 6, 9, 11.

$2p = 6$ Δ $L_1 - 11, 13-5, 8-17$; $L_2 - 6, 12-15, 18-2$; $L_3 - 9, 14-1, 3-7$, свободно: 4, 10, 16.

$2p = 4$ YY $L_1 - 11, 7-18, 13-2$; $L_2 - 14-17, 4-10-16$; $L_3 - 3-5, 1-12, 8-15$; свободны: 6, 9.

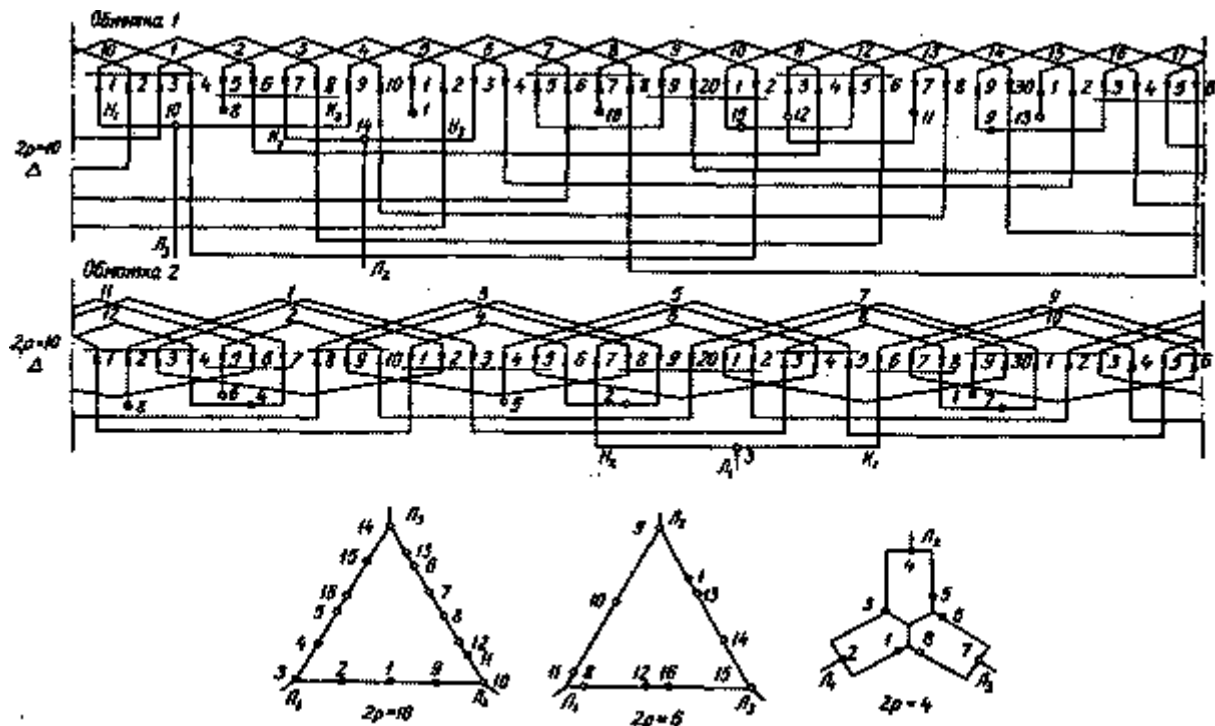


Рис. 3. 11. Схема Х1/10-6-4. Число выводов обмотки статора – 16.

Соединение выводов и подключение к сети:

$2p = 10\Delta$ Л₁ – 3; Л₂ – 10, 11-12, 6-13; Л₃ – 14, 5-16; свободны: 1, 2, 4, 7, 8, 9, 15

$2p = 6\Delta$ Л₁ – 8-11, 12-16; Л₂ – 9; Л₃ – 15, 1-13; свободно: остальные.

$2p = 4Y$ Л₁ – 2; Л₂ – 4, 1-3-5-6-8; Л₃ – 7; свободны: остальные.

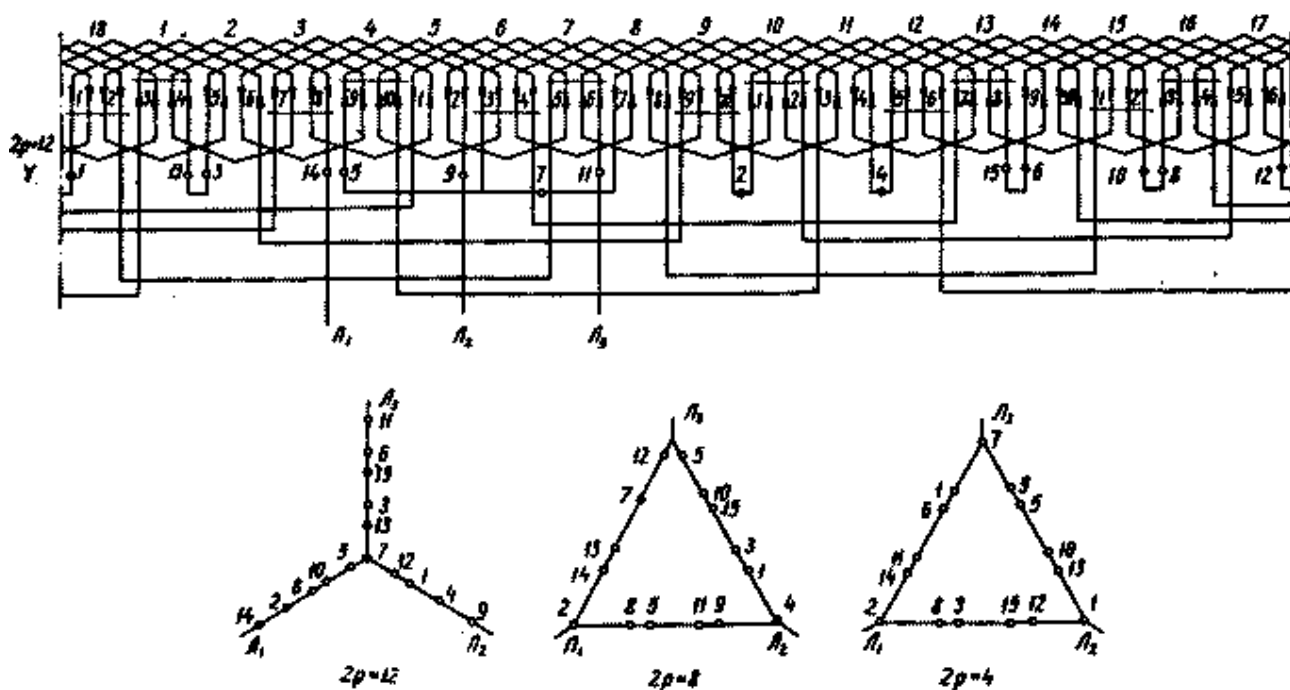


Рис. 3. 12. Схема ХЗ/12-8-4. Число выводов обмотки статора – 15.

Соединение выводов и подключение к сети:

$2p = 12Y$ Л₁ – 14, 8-10, 5-7; Л₂ – 9, 1-12; Л₃ – 11, 6-15, 3-13; свободны: 2, 4

$2p = 8\Delta$ Л₁ – 2, 14-13; Л₂ – 4, 9-11, 6-8; Л₃ – 12-5, 10-15, 3-1; свободно: 7

$2p = 4\Delta$ Л₁ – 1, 14-11, 6-1; Л₂ – 7, 9-5, 10-13; Л₃ – 4, 12-15, 3-8;

3. 4. Схемы обмоток статора четырехскоростных асинхронных двигателей.

Примеры трехфазных обмоток статора с переключением на четыре различных варианта числа пар полюсов приведены соответственно на рис. 3.13, 3.14 и 3.15.

Приведенные варианты схем обмоток статора многоскоростных двигателей относятся к асинхронным двигателям серии Т и используются при изготовлении 2– 3– и 4– скоростных асинхронных короткозамкнутых двигателей.

Контрольные вопросы

1. Принцип регулирования числа полюсов в многоскоростных асинхронных двигателях.
2. Устройство обмоток с переключением числа полюсов.
3. На сколько скоростей изготавливаются современные многоскоростные асинхронные двигатели?

Рекомендуемая литература: [1 ,10].

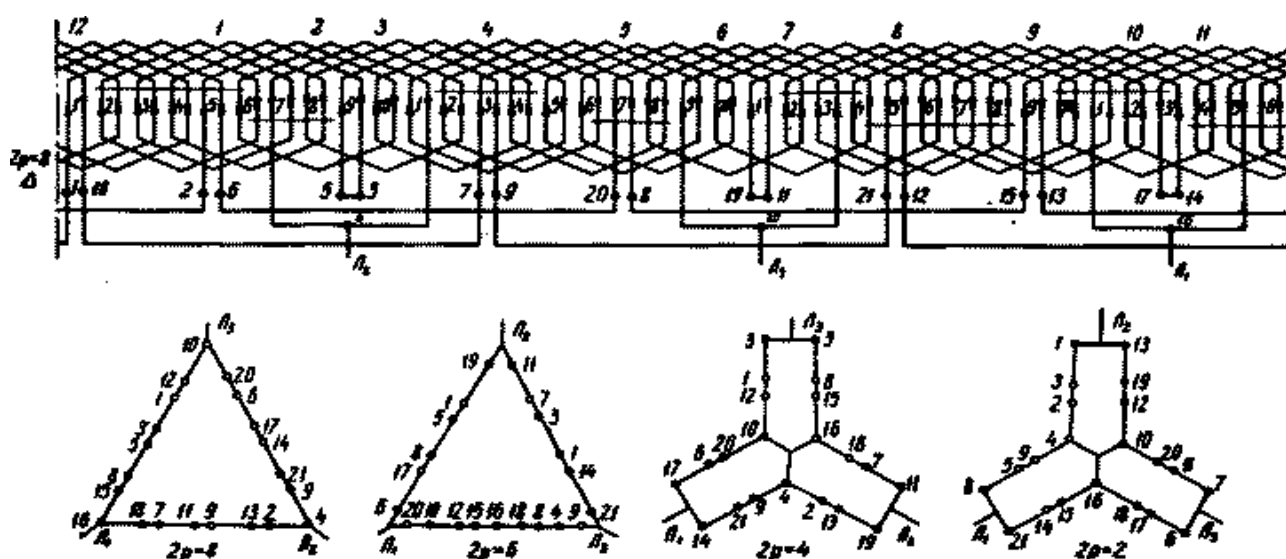


Рис. 3. 13. Схема 2/8–6–4–2. Число выводов обмотки статора – 21.

Соединение выводов и подключение к сети:

$2p = 8 \Delta$ Л₁ – 16, 18–7, 11–9, 13–2; Л₂ – 4, 9–21, 14–17, 6–20; Л₃ – 10, 12–1, 3–5, 8–15;

$2p = 6 \Delta$ Л₁ – 6–20, 12–15, 18–2; Л₂ – 9–21, 14–1, 3–7; Л₃ – 11–19, 13–5, 8–17;

свободно: 4, 10, 16.

$2p = 4 \text{ Y}$ Л₁ – 14–17, 21–9, 6–20, 4–10–16; Л₂ – 11–19, 7–18, 13–2; Л₃ – 3–5, 1–12, 8–15.

$2p = 2 \text{ Y}$ Л₁ – 8–21, 5–9, 14–15, 4–10–16; Л₂ – 1–13, 3–2, 19–12; Л₃ – 6–7, 11–20, 17–18.

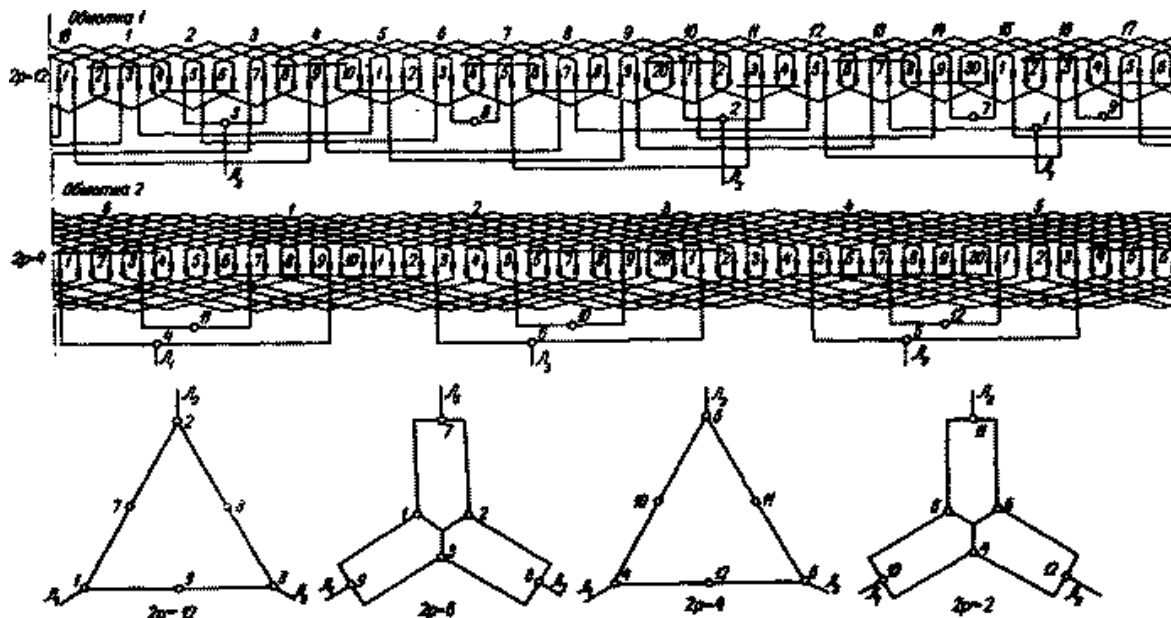


Рис. 3. 14. Схема С4/12-6-4-2. Число выводов обмотки статора – 12.

Соединение выводов и подключение к сети:

$2p = 12\Delta$ $L_1 - 1$; $L_2 - 2$; $L_3 - 3$; свободны: остальные.

$2p = 6Y$ $L_1 - 9$; $L_2 - 8, 1-2-3$; $L_3 - 7$; свободно: остальные.

$2p = 4\Delta$ $L_1 - 4$; $L_2 - 5$; $L_3 - 6$; свободны: остальные.

$2p = 2Y$ $L_1 - 10$; $L_2 - 12, 4-5-6$; $L_3 - 11$; свободны: остальные.

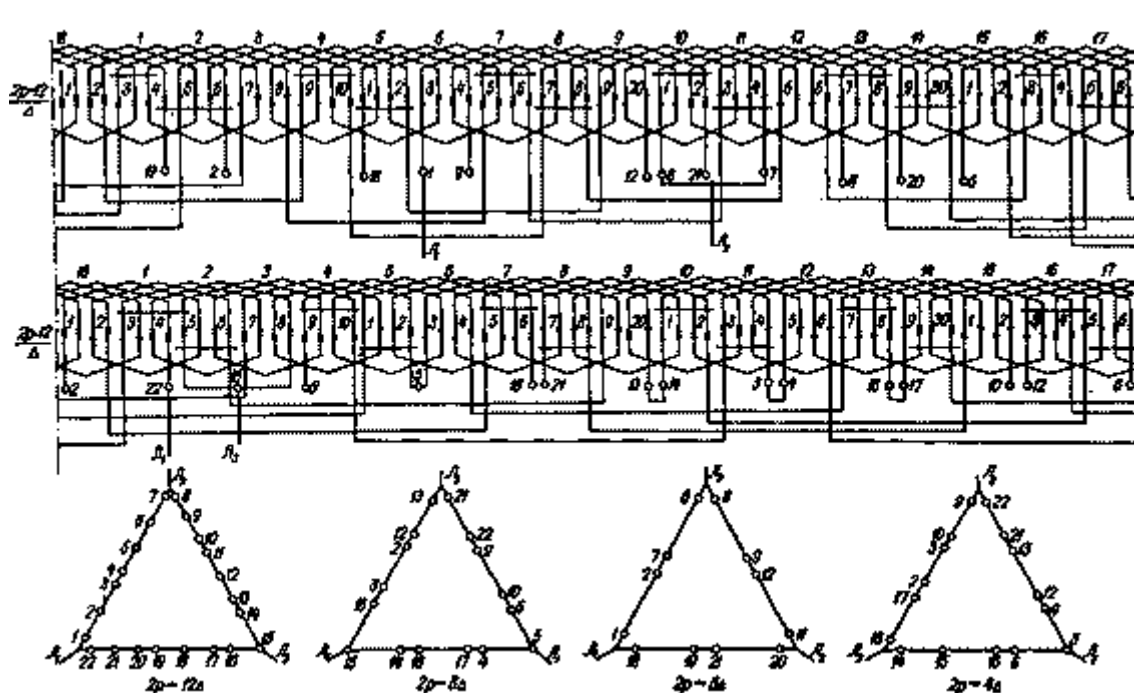


Рис. 3. 15. Схема X2/12-8-6-4. Число выводов обмотки статора – 22.

Соединение выводов и подключение к сети:

$2p = 12\Delta$ $L_1 - 1-22, 3-4$; $L_2 - 7-8, 10-11, 13-14$; $L_3 - 15, 16-17, 19-20$;
свободны: 2, 5, 6, 9, 12, 18, 21.

$2p = 8\Delta$ $L_1 - 5, 4-17, 18-14$; $L_2 - 15, 16-3, 2-12$; $L_3 - 13-21, 22-9, 10-6$;
свободны: 1, 7, 8, 11, 19, 20.

$2p = 6\Delta$ $L_1 - 1-18, 2-7$; $L_2 - 11-20, 21-19$; $L_3 - 6-8, 9-12$;
свободны: остальные.

$2p = 4\Delta$ $L_1 - 5, 6-16$; $L_2 - 14-18, 17-2, 3-10$; $L_3 - 9-22, 21-13, 12, 4$.
свободны: остальные.

4. Обмотки трансформаторов.

4. 1. Типы обмоток трансформаторов.

Все обмотки трансформаторов по характеру намотки можно подразделить на следующие основные типы: цилиндрические из круглого и прямоугольного провода, винтовые, непрерывно катушечные и др.

Эти типы обмоток в свою очередь могут подразделяться по ряду второстепенных признаков: числу слоев или ходов, наличию параллельных ветвей, наличию транспозиций и т. д.

Простой цилиндрической обмоткой называется обмотка, сечение витка которой составляет один провод, а витки расположены без интервалов на цилиндрической поверхности так, что для перехода от какого-либо витка к любому другому витку нужно двигаться в осевом направлении обмотки.

Цилиндрической параллельной обмоткой называется обмотка, сечение витка которой составляет несколько параллельных проводов, а витки расположены (без интервалов между витками и проводами) на цилиндрической поверхности так, что для перехода от какого-либо провода одного витка к любому проводу другого витка нужно двигаться в осевом направлении обмотки.

Двухслойной простой цилиндрической или двухслойной цилиндрической параллельной называется обмотка, составленная из двух концентрически расположенных простых цилиндрических параллельных обмоток. Цилиндрическая обмотка может быть намотана из нескольких проводов прямоугольного сечения. При этом желательно все параллельные провода брать одного сечения. Если же приходится комбинировать сечение витка из разных проводов, то рекомендуется брать не более двух различных сечений проводов. Обычно применяется намотка "плашмя". Допускается намотка на "ребро", в радиальном направлении обмотки, размеры обоих проводов следует выбирать обязательно равными между собой.

В производстве при намотке на обмоточном станке цилиндрическая обмотка является самой простой и дешевой из применяемых типов обмоток. Цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода может применяться при сечении витка не менее 5 мм^2 , равном минимальному сечению прямоугольного провода по сечению, что соответствует при наименьшей плотности тока в медном проводе нижнему пределу тока обмотки 15–18 А. Цилиндрическая двухслойная обмотка из прямоугольного провода широко применяется для обмоток НН трехфазных и однофазных масляных силовых трансформаторов с мощностью на один стержень $S \leq 200 \text{ кВА}$ при напряжении обмотки не выше 6 кВ.

В тех же пределах этот тип обмотки иногда применяется для обмоток ВН, однако более удобна в этом случае многослойная цилиндрическая обмотка из круглого провода.

Широкое применение находят цилиндрические многослойные обмотки из прямоугольного провода в один или несколько параллельных проводов. Для таких обмоток напряжение составляет до 35 кВ, а мощность трансформатора до 80000 кВА.

Они используются для изготовления обмоток как низкого напряжения, так и обмоток высокого напряжения трансформатора. Основное достоинство этих обмоток состоит в простоте, малой стоимости и достаточно высокой электрической и механической прочности (рис. 4. 1).

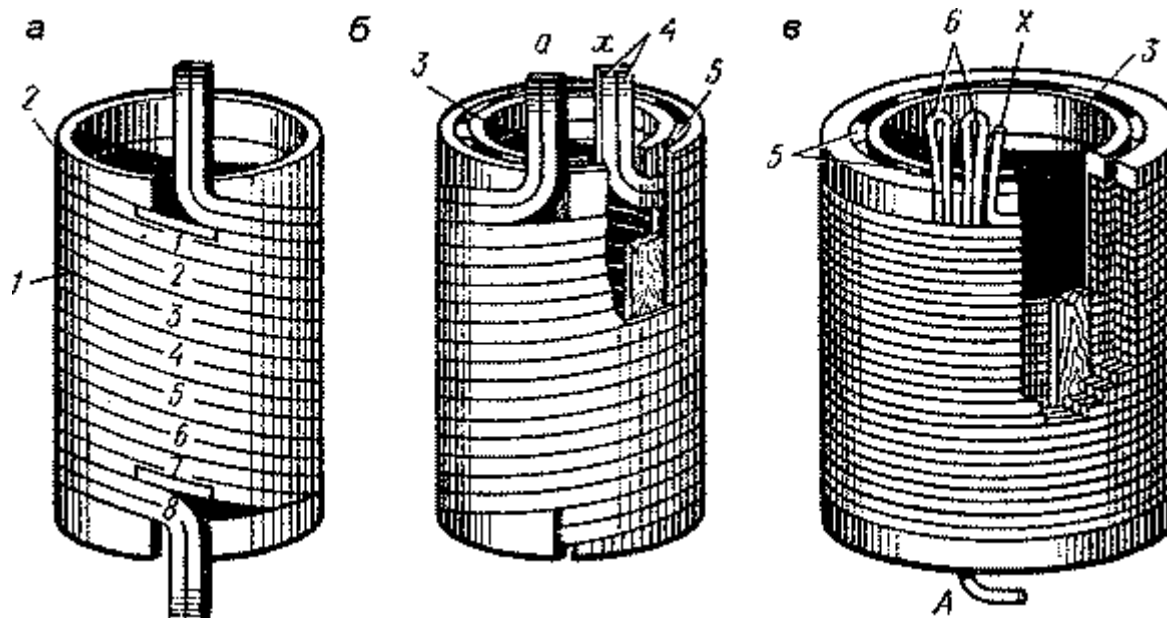


Рис. 4. 1. Цилиндрические обмотки: *а* – однослойная; *б* – двухслойная; *в* – многослойная из круглого провода; 1 – витки из прямоугольного провода; 2 – разрезные выравнивающие кольца; 3 – бумажно-бакелитовый цилиндр; 4 – конец первого слоя обмотки; 5 – вертикальные рейки; 6 – внутренние ответвления обмотки.

Благодаря простоте и дешевизне изготовления наиболее часто применяется многослойная цилиндрическая обмотка трансформаторов, мощностью на один стержень до 200 кВА при классе напряжения не выше 35 кВ.

Разновидностью *многослойной цилиндрической обмотки* является катушечная обмотка, составленная из ряда отдельно расположенных в осевом направлении катушек, представляющих собой многослойные цилиндрические обмотки. Выполняется она, как правило, из одного круглого провода без применения параллельных проводов. Применяется для трансформатора с мощностью на один стержень не выше 350 кВА, при токе 40–45 А, и только для выполнения обмоток ВН.

Особое внимание уделяется междуслойной изоляции, так как вследствие большого числа витков и последовательного соединения слоев между соседними витками, лежащих в разных слоях, возникают значительные напряжения. Так, например, в трансформаторах с мощностью на один стержень до 200 кВА при классе напряжения от 3 до 35 кВ суммарное рабочее напряжение двух слоев может достигнуть 5000–6000 В, а испытательное 10000–12000 В. В качестве междуслойной изоляции хорошие результаты дает кабельная бумага, положенная в несколько слоев.

Применение меньшего числа слоев более толстого электрокартона не оправдывает себя, так как картон менее эластичен, чем кабельная бумага, а при намотке сильно натянутого провода дает изломы, что в дальнейшем приводит к прибою междуслойной изоляции.

В трансформаторах широко применяются винтовые обмотки. Обычно винтовая обмотка наматывается на бумажно – бакелитовом цилиндре на рейках, расположенных по образующим цилиндра. Радиальные каналы между витками образуются межвитковыми прокладками из электроизоляционного картона, нанизываемыми на рейки (рис. 4. 2).

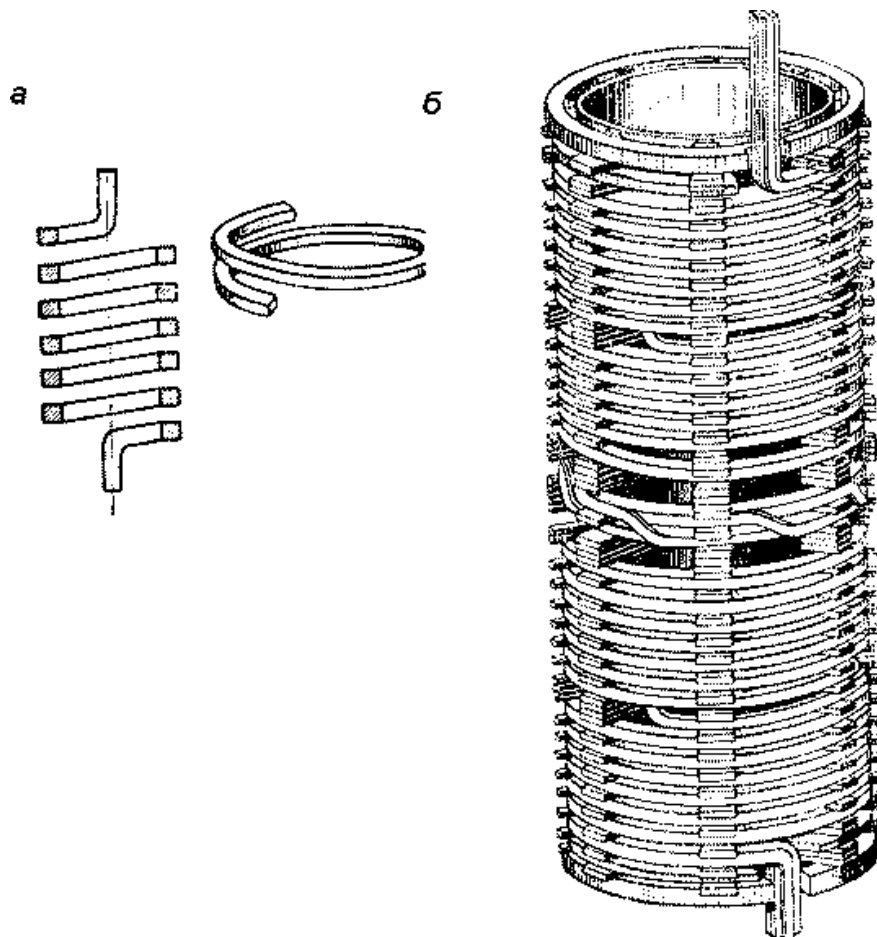


Рис. 4. 2. Винтовая обмотка: *а* – из одного провода в витке; *б* – из нескольких параллельных проводов в витке.

В параллельной винтовой обмотке параллельные провода наматываются на цилиндрические поверхности с разными диаметрами. Вследствие этого активные и реактивные сопротивления (в виду различной индукции поля рассеяния) параллельных проводов получаются неравными. Для выравнивания полных сопротивлений проводов во избежание неравномерного распределения тока в винтовой обмотке обязательно должна производиться транспозиция (перекладка) проводов (рис. 4. 3).

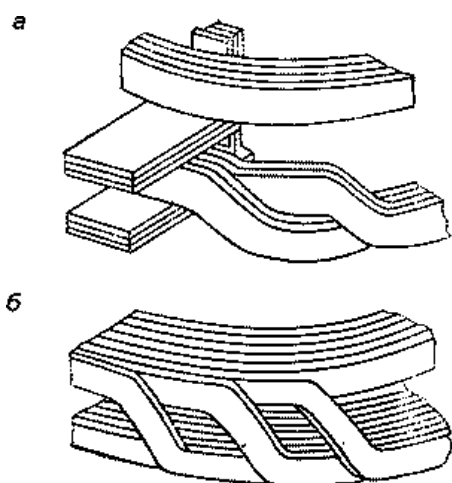


Рис. 4. 3. Транспозиции проводов в винтовых обмотках:
а – групповая; *б* – общая.

Схема транспозиции в винтовой обмотке из четырех проводов представлена на рис. 4. 4.

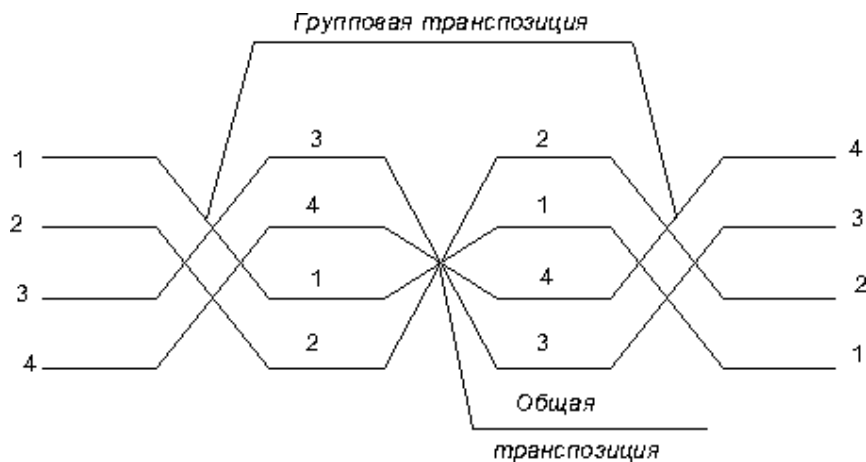


Рис. 4. 4. Схема транспозиции в винтовой обмотке из четырех параллельных проводов: 1–4 – провода.

Применяются винтовые обмотки как обмотки НН в трансформаторах с напряжением на стороне НН от 230 В до 15,75 кВ включительно при мощности трансформатора на один стержень от 45 до 350 кВА.

Простой непрерывной катушечной обмоткой называется обмотка, составленная из ряда расположенных в осевом направлении и соединенных последовательно катушек, намотанных из прямоугольного провода по плоской спирали, с радиальными охлаждающими каналами между всеми или частью катушек. Высота катушки равна высоте провода.

Непрерывная катушечная обмотка называется *параллельной*, если сечение каждого витка составлено двумя или более параллельными проводами и число витков в катушке более одного (рис. 4.5).

Обмотка называется *непрерывной*, если ее намотка ведется одним (двумя, тремя и более) проводом без перепайки концов последовательно соединенных катушек. Непрерывная катушечная обмотка не имеет обрывов и паяк провода.

Благодаря высокой механической прочности, легкости распределения витков обмотки по катушкам, удобству выполнения регулировочных ответвлений, сравнительной простоте намотки, отсутствию перепаяк между катушками и простоте насадки на сердечник, непрерывная катушечная обмотка находит широкое применение в качестве обмотки ВН для трансформаторов с мощностью на один стержень от 50 до 20000 кВА и выше, при токах нагрузки от 10–15 А и выше. Этот тип обмотки находит применение также и в качестве обмоток НН при токах от 17–20 и до 300 А.

При напряжении 110 кВ и выше применяется только непрерывная катушечная обмотка. Если виток обмотки выполняется из нескольких параллельных проводов, то необходимо проводить транспозицию параллельных проводов аналогично, как это производится в винтовых параллельных обмотках.

Более подробно правила выполнения обмоток различного типа приводятся ниже при пояснении методики расчета.

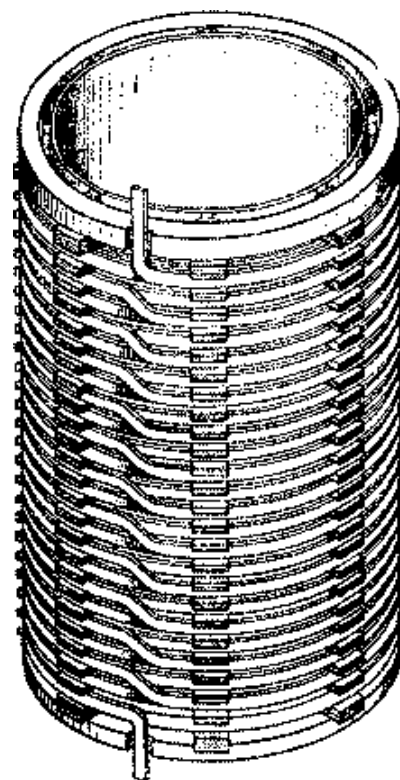


Рис. 4. 5. Непрерывная катушечная обмотка.

4. 2. Выбор типа обмотки.

Основными критериями при выборе типа обмотки служат следующие величины:

$I_\Phi = I_c$ – ток нагрузки одного стержня, мощность обмоток одного стержня S' и номинальное напряжение U_Δ , а также поперечное сечение витка обмотки Π . Ориентировочное сечение, мм^2 , витка каждой обмотки может быть определено по формуле:

$$\Pi = \frac{I_c}{\Delta_{\text{ср}}}$$

где I_c – ток соответствующей обмотки одного стержня, ток фазный; $\Delta_{\text{ср}}$ – средняя плотность тока в обмотках ВН и НН.

В зависимости от выбора значения $\Delta_{\text{ср}}$ будут изменяться объем и масса обмотки, а следовательно, и электрические потери в них P_Σ . Обычно при расчете трансформатора потери короткого замыкания P_K бывают заданы, и выбор средней плотности тока должен быть связан с заданной величиной P_K .

Для определения средней плотности тока в обмотках, обеспечивающей получение заданных потерь короткого замыкания, можно воспользоваться формулами:

– для медных обмоток:

$$\Delta_{\text{ср}} = 0,745 \times K_A \times \frac{P_K \times U_b}{S \times d_{12}} \text{ А/мм}^2$$

– для алюминиевых:

$$\Delta_{\text{ср}} = 0,464 \times K_A \times \frac{P_K \times U_b}{S \times d_{12}} \text{ А/мм}^2$$

где S – полная мощность трансформатора, кВА; P_K – потери короткого замыкания, Вт; U_b – напряжение одного витка; d_{12} – средний диаметр канала между обмотками, см; K_d – коэффициент, учитывающий наличие добавочных потерь в обмотках, потери в отводах, в стенах бака и т. д., принимается по табл. 4. 1.

Таблица 4. 1. Значение K_d для трехфазных трансформаторов.

Мощность трансформатора, кВА	До 100	160–630	1000–6300	10000–16000	25000–63000	80000–100000
K_d	0,96	0,96–0,92	0,91–0,90	0,90–0,87	0,86–0,78	0,77–0,75

Примечание. Для сухих трансформаторов мощностью 10 – 160 кВА принимать $K_d = 0,99$ – 0,96 и мощностью 250 – 1600 кВА $K_d = 0,92$ – 0,96.

Расчетные значения $\Delta_{\text{ср}}$ следует сверить с данными табл. 4. 2, где приведены ориентировочные значения практически применяемых плотностей токов. Сверка рассчитанного $\Delta_{\text{ср}}$ имеет целью избежать грубых ошибок в расчете $\Delta_{\text{ср}}$.

Таблица 4. 2. Средняя плотность тока в обмотках Δ , А/мм², для современных трансформаторов с потерями короткого замыкания

а) масляные трансформаторы

Мощность трансформатора, кВА	25–40	63–630	1000–6300	10000–16000	25000–80000
Медь	1,8–2,2	2,2–3,5	2,2–3,5	2,0–3,5	2,0–3,5
Алюминий	1,1–1,8	1,2–2,5	1,5–2,6	1,5–2,7	–

б) сухие трансформаторы

Мощность транс- форматора, кВА	10–160; 0,5 кВ		160–1600; 10 кВ	
Обмотка	Внутренняя НН	Наружная ВН	Внутренняя НН	Наружная ВН
Медь	2,0–1,4	2,2–2,8	2,0–1,2	2,0–2,8
Алюминий	1,3–0,9	1,3–1,8	1,4–0,8	1,4–2,0

Примечания: 1. Для трансформатора с потерями короткого замыкания вышеуказанных государственных стандартов возможен выбор плотности тока в масляных трансформаторах до $4,5 \text{ А/мм}^2$ в медных и до $2,7 \text{ А/мм}^2$ – алюминиевых обмотках; в сухих трансформаторах – соответственно до 3 и 2 А/мм^2 . 2. Плотность тока в обмотках из транспонированного провода выбирается так же, как и для медного или алюминиевого провода. 3. Плотность тока в обмотках из алюминиевой ленты выбирается как для алюминиевого провода.

После определения средней плотности тока $\Delta_{\text{ср}}$ и сечения витка Π для каждой из обмоток можно произвести выбор типа конструкции обмотки. Конструкция и тип обмотки выбираются по табл. 4. 3.

При расчете обмоток существенное значение имеет правильный выбор размеров провода. В обмотках из круглого провода выбирают провод, ближайший по площади поперечного сечения к сечению Π , определенному по выбранной плотности тока $\Delta_{\text{ср}}$, или в некоторых случаях подбираются два–три провода с соответствующим общим суммарным сечением.

При расчете винтовых, непрерывных катушечных и в большинстве случаев двухслойных и многослойных цилиндрических обмоток из провода прямоугольного сечения желательно применять провода большего сечения, что упрощает намотку обмоток на станке и позволяет получить наиболее компактное ее размещение на сердечнике. Однако применение крупных размеров провода ограничивается условиями охлаждения обмотки и величиной допустимых добавочных потерь от вихревых токов, вызываемых потоком рассеяния.

Расчет обмоток проводится в следующей последовательности:

– определяется число витков в фазе соответствующей обмотки:

$$W_{\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{U_{\text{В}}}$$

После округления числа витков до целого числа уточняется напряжение одного витка $U_{\text{В}}$ и значение магнитной индукции в стержне, $B_{\text{с}}$;

– определяется ориентировочное сечение, мм^2 , витка соответствующей обмотки по выражению:

$$\Pi = \frac{I_{\Phi}}{\Delta_{\text{ср}}}$$

– по ориентировочному сечению обмотки сортаменту обмоточных проводов принимаются соответствующие провода. Проводов может быть один или несколько. Примеры витков для различных обмоток приведены ниже.

В масляных трансформаторах применяется провод марки ПБ (с бумажной изоляцией).

В сухих трансформаторах применяется обычно более качественная изоляция марок ПСД и ПСДК.

- по основным параметрам трансформатора S_H – номинальной мощности; U_H – номинальным напряжениям обмоток НН и ВН; I_Φ – номинальному фазному току обмоток выбирается тип обмоток по табл. 4. 3.
- по выбираемому типу соответствующих обмоток производится расчет обмоток по методикам, приведенным ниже.

Таблица 4. 3. Основные свойства и нормальные пределы применения различных типов обмоток масляных, а также сухих трансформаторов.

Тип обмотки	Применение на стороне		Основные достоинства	Основные недостатки	Материал обмоток	Пределы применения, включительно				Число параллельных проводов
	главное	возможное				по мощности трансформатора S, кВА	по току на стержень I, А	по напряжению U, кв	по сечению витка, П, мм ²	
Цилиндрическая одно- и двухслойная из прямоугольного провода	НН	ВН	Простая технология изготовления, хорошее охлаждение	Малая механическая прочность	Медь	До 630	От 15–18 до 800	До 6	От 5,04 до 250	От 1 до 4–8
					Алюминий	До 630	От 10–13 до 600–650	До 6	От 6,39 до 300	
Цилиндрическая многослойная из прямоугольного провода	ВН	НН	Хорошее заполнение окна магнитной системы, простая технология изготовления	Уменьшение охлаждаемой поверхности по сравнению с обмотками, имеющими радиальные каналы	Медь	От 630 до 80000	От 15–18 до 1000–1200	10 и 35	От 5,04 до 400	От 1 до 4–8
					Алюминий	До 16000–25000	От 10–13 до 1000–1200	10 и 35	От 6,39 до 500	
Цилиндрическая многослойная из алюминиевой ленты	НН	–	Простая технология изготовления, хорошее охлаждение, хорошее заполнение окна магнитной системы	Малая механическая прочность в радиальном направлении	Алюминий	От 160 до 1000	От 100 до 1500	До 10	От 100 до 1000	От 1 до 1
Цилиндрическая многослойная из круглого провода	ВН	НН	Простая технология изготовления	Ухудшение теплоотдачи и уменьшение механической прочности с ростом мощности.	Медь	До 630	От 0,3–0,5 до 80–100	До 35	От 1,094 до 42,44	1 2
					Алюминий	До 630	От 2–3 до 125–135	До 35	От 1,37 до 50,24	1 1
Винтовая одно-, двух- и многоходовая из прямоугольного провода	НН	–	Высокая механическая прочность, надежная изоляция, хорошее охлаждение	Более высокая стоимость по сравнению с цилиндрической обмоткой	Медь	От 160 и выше	От 300 и выше	До 35	От 75–100 и выше	4 12–16 и более
					Алюминий	От 100 и выше	От 150–200 и выше	До 35	От 75–100 и выше	
Непрерывная катушечная из прямоугольного провода	ВН	НН	Высокая электрическая и механическая прочность, хорошее охлаждение	Необходимость перекладки половины катушек при намотке	Медь	От 160 и выше	От 15–18 и выше	От 3 до 110–220	От 5,04 и выше	1 3–5
					Алюминий	От 100 и выше	От 10–13	От 3 до 110–	От 6,39	

4. 3. Методика расчета обмоток различных типов.

В процессе расчета обмотки следует добиваться наибольшей компактности в ее размещении, распределении витков и катушек с тем, чтобы получить наилучшее заполнение окна трансформатора. Одновременно следует стремиться к получению более развитой поверхности охлаждения обмотки и обеспечению достаточных размеров охлаждающих каналов, что даст возможность уменьшить внутренний перепад температуры в обмотках и, как следствие этого, несколько уменьшить охлаждающую поверхность бака трансформатора. Расчет обмоток начинается с обмотки низкого напряжения.

Расчет обмоток НН. Число витков на одну фазу обмотки НН определяется:

$$W_1 = \frac{U_{\Phi 1}}{U_b}$$

Полученное значение W_1 округляется до ближайшего целого числа, которое может быть как четным, так и нечетным. После округления числа витков следует уточнить напряжение одного витка, вольт:

$$U_b = \frac{U_{\Phi 1}}{W_1}$$

и определить действительную индукцию, $Tл$, в стержне

$$B_c = \frac{U_b \times 10^4}{4,44 \times f \times \Pi_c}$$

Дальнейший расчет для каждого типа обмоток НН производится своим особым путем.

4. 3. 1. Расчет цилиндрических обмоток из прямоугольного провода.

Различают однослойные, двухслойные и многослойные цилиндрические обмотки из прямоугольного провода.

Число витков в одном слое:

- для однослойной обмотки $W_{сл1} = W_1$
- для двухслойной обмотки $W_{сл1} = W_1/2$
- для многослойной обмотки $W_{сл1} = W_1/n$, где n – число слоев.

Однослойные и двухслойные обмотки применяются обычно как обмотки НН, многослойные обмотки могут быть как обмотками НН, так и обмотками ВН.

Ориентировочный осевой размер, см., витка:

$$h_{в1} = \frac{I}{W_{сл} + 1}$$

где I – высота обмотки.

Ориентировочное сечение, мм², витка:

$$\Pi = \frac{I_{сл1}}{\Delta_{ср}} \text{ или } \Pi = \frac{I_{\Phi 1}}{\Delta_{ср}}$$

По полученным величинам Π_1 и $h_{в1}$, по сортаменту обмоточного провода для трансформаторов подбираются подходящие провода с соблюдением следующих правил:

- число параллельных проводов $n_{в1}$ не более 4 – 6 при намотке "плашмя" и не более 6 – 8 при намотке "на ребро";
- число различных размеров проводов не более 2;
- радиальные размеры всех параллельных проводов витка равны между собой;
- при намотке "на ребро" отношение радиального размера провода к осевому его размеру – не менее 1,3 и не более 3;
- расчетная высота обмотки $(W_{сл1} + 1) \times h_{в}$ на 0,5 – 1,5 см. меньше, чем l .

Размеры провода записываются следующим образом:

$$\text{марка провода} \times \text{число параллельных проводов} \times \frac{\text{размер провода без изоляции}}{\text{размер провода с изоляцией}}$$

$$\Pi Б \times n_{в} \times \frac{a \times b}{a' \times b'}$$

Полное сечение, мм^2 , витка из n_{B1} параллельных проводов определяется по формуле:

$$\Pi_1 = \sum_1^{n_{B1}} \Pi_1$$

где Π_1 – сечение одного провода.

Осевой размер обмотки, см .:

$$l_1 = h_{B1} \times (W_{\text{СП1}} + 1) + \frac{0,5}{1,5}$$

при намотке "на ребро": $h_B = n_B \times \alpha'$;

при намотке "плашмя": $h_B = n_B \times b'$.

Радиальный размер однослойной обмотки $\alpha_1 = \alpha'$, при намотке "плашмя" и $\alpha_1 = b'$ при намотке "на ребро". Для двухслойной обмотки $\alpha_1 = 2 \times \alpha'$ при намотке "плашмя" и $\alpha'_1 = 2 \times b'$ при намотке "на ребро".

Внутренний диаметр обмотки: $D_1 = d + 2 \times \alpha_{01}$

Наружный диаметр обмотки: $D'_1 = D_1 + 2 \times \alpha_1$

Однослойная обмотка и двухслойная без охлаждающего канала между слоями имеют две охлаждаемые поверхности. Полная охлаждаемая поверхность, м^2 , обмотки НН для всего трансформатора в этом случае:

$$\Pi_{01} = c \times K \times \Pi \times (D_1 + D'_1) \times l_1 \times 10^{-4}$$

Двухслойная обмотка с каналом между слоями имеет четыре охлаждаемые поверхности:

$$\Pi_{01} = 2 \times c \times K \times \Pi \times (D_1 + D'_1) \times l_1 \times 10^{-4}$$

где c – число стержней; K – коэффициент, учитывающий закрытие части поверхности обмотки рейками и другими изоляционными деталями; $K = 0,75$.

Для многослойной обмотки, м^2 , с каналами между всеми слоями:

$$\Pi_{01} = n \times c \times K \times \Pi \times (D_1 + D''_1) \times l_1 \times 10^{-4}$$

где n – число слоев. Компоновка витка цилиндрических обмоток показана на рис 4. 6, а, б, в, г, компоновка витка параллельной одноходовой и двухходовой обмотки – рис. 4. 6, д, е.

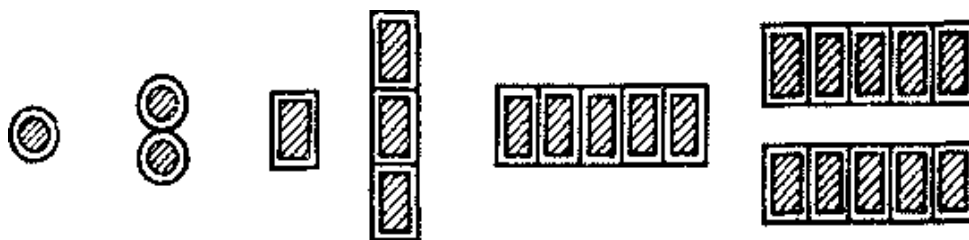


Рис. 4. 6. Формы сечения и компоновки витка обмотки при различных размерах поперечного сечения и различном числе параллельных проводов: а – цилиндрическая обмотка из круглого провода с одним проводом в витке; б – цилиндрическая обмотка из круглого провода с двумя проводами в витке; в – цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода с одним проводом в витке; г – цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода с тремя параллельными проводами в витке; д – винтовая одноходовая обмотка с пятью параллельными проводами в витке; е – винтовая двухходовая обмотка с десятью параллельными проводами в витке.

4.3.2. Расчет многослойной цилиндрической обмотки из прямоугольного провода.

Устройство многослойной цилиндрической обмотки из прямоугольного провода поясняет рис. 4. 7.

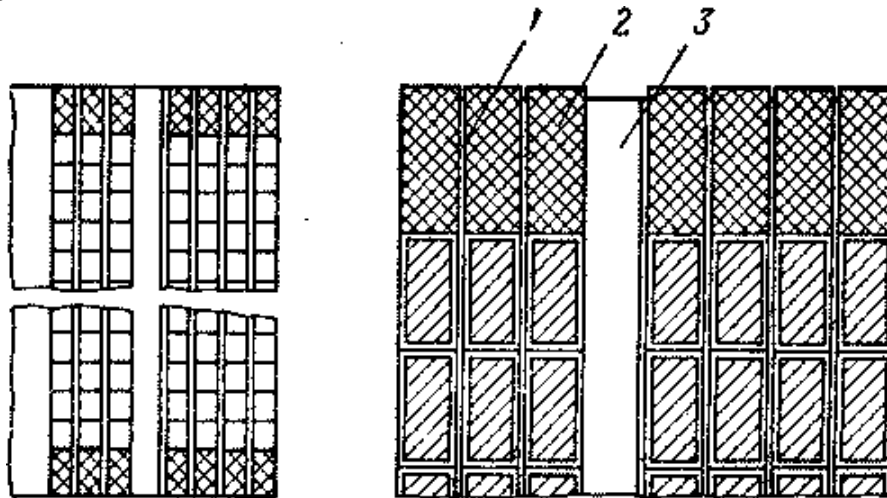


Рис. 4. 7. Многослойная цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода: 1 – междуслойная изоляция из кабельной бумаги; 2 – бумажно-бакелитовое опорное кольцо; 3 – рейка, образующая охлаждающий канал.

Реальные сечения проводов подбираются по табл. 4. 4 – 4. 5 и записываются так:

$$\text{марка провода} \times \frac{\text{размеры провода без изоляции}}{\text{размеры провода в изоляции}}$$

или

$$\text{марка провода} \times n_B \times \frac{a \times b}{a' \times b'}$$

Полное сечение витка, мм²: $\Pi = \Pi_B \times \Pi'$

Полученная плотность тока, А/мм²:

$$\Delta_1 = \frac{I_1}{\Pi_1} - \text{для обмотки НН}, \quad \Delta_1 = \frac{I_2}{\Pi_2} - \text{для обмотки ВН}$$

Число витков в слое соответственно для обмотки НН и ВН:

$$W_{\text{сл1}} = \frac{l_1}{n_{B1} \times b'} - 1 \quad W_{\text{сл2}} = \frac{l_2}{n_{B2} \times b'} - 1$$

где $l_1 = l_2$, см.

Число слоев в обмотке:

$$n_{\text{сл1}} = \frac{W_1}{W_{\text{сл1}}} \quad n_{\text{сл2}} = \frac{W_2}{W_{\text{сл2}}}$$

($n_{\text{сл2}}$ округляется до ближайшего большего числа). Рабочее напряжение двух слоев, В:

$$U_{\text{МС}} = 2 \times W_{\text{сл}} \times U_B$$

По рабочему напряжению двух слоев выбираются число слоев и общая толщина $\delta_{\text{МС}}$ кабельной бумаги изоляции между двумя слоями обмотки.

В обмотках классов напряжения 20 и 35 кВ под внутренним слоем обмотки устанавливается металлический экран – незамкнутый цилиндр из листа немагнитного металла толщиной 0,5 мм. Экран соединяется электрически с линейным концом обмотки (начало внутреннего слоя) и изолируется от внутреннего слоя обмотки обычной междуслойной изоляцией. Такая же изоляция экрана устанавливается со стороны масляного канала. Радиальный размер обмотки без экрана, см:

– для обмоток НН

$$\alpha_1 = [\alpha' \times n_{\text{сл1}} + \delta_{\text{мс}} \times (n_{\text{сл1}} - 1) + \alpha'_{11} \times n_{\text{к}}] \times 10^{-1}$$

– для обмоток ВН

$$\alpha_2 = [\alpha'_2 \times n_{\text{сл2}} + \delta_{\text{мс}} \times (n_{\text{сл2}} - 1) + \alpha'_{22} \times n_{\text{к}}] \times 10^{-1}$$

где α'_{11} и α'_{22} – радиальные размеры охлаждающих каналов.

Размеры α' , $\delta_{\text{мс}}$, α'_{11} , α'_2 , α'_{22} подставляются в мм.

Радиальный размер обмотки с экраном, см.:

$$\alpha_{2\text{ЭКР}} = \alpha_2 + 0,3$$

где для классов напряжения 20 и 35 кВ принято увеличение радиального размера обмотки за счет экрана и двух слоев междуслойной изоляции на 0,003 м (0,3 см.).

Минимальный радиальный размер α_{12} осевого канала между обмотками НН и ВН и толщина изоляционного цилиндра выбираются по испытательному напряжению обмотки ВН и мощности трансформатора для масляных трансформаторов.

Различные варианты конструктивного исполнения многослойной цилиндрической обмотки из круглого или прямоугольного провода показаны на рис. 4. 8.

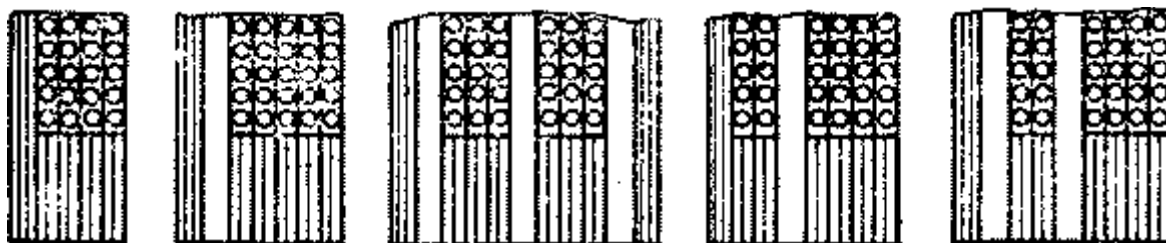


Рис. 4. 8. Конструктивное исполнение многослойной цилиндрической обмотки,

Внутренний диаметр обмотки НН, см.,

$$D'_1 = d + 2\alpha_{01}$$

Внешний диаметр обмотки НН, см.,

$$D''_1 = D'_1 + 2\alpha_1$$

Внутренний диаметр обмотки ВН (при наличии экрана до его внутренней изоляции), см.,

$$D'_2 = D'_1 + 2\alpha_{12}$$

Наружный диаметр обмотки, м:
без экрана

$$D''_2 = D'_2 + 2\alpha_2$$

с экраном

$$D''_2 = D'_2 + 2\alpha_{2\text{ЭКР}}.$$

Поверхность охлаждения, м^2 ,
для обмотки НН

$$\Pi_{01} = \pi k \pi (D_1' + D_1'') l_1 \times 10^{-4}$$

для обмотки ВН

$$\Pi_{02} = \pi k \pi (D_2' + D_2'') l_2 \times 10^{-4}$$

4. 3. 3. Расчет одноходовых, двухходовых и многоходовых винтовых обмоток.

Осевой размер одного витка:

– для одноходовой обмотки, см. :

$$h_{B1} = \frac{I_1}{W_1 + 4} - h_{K1}$$

– для двухходовой обмотки с равномерно распределенной транспозицией, см. :

$$h_{B1} = \frac{I_1}{W_1 + 1} - h_{K1}$$

где h_{K1} – осевой размер масляного охлаждающего канала между витками. Ориентировочно $h_{K1} \times 0,1 \times a_1$, но не менее 0,4 см. , где a_1 – радиальный размер обмотки НН, приближенно определенный в разд. 4. При $h_{B1} \leq 1,5 \text{ см.}$ следует применять одноходовую обмотку, а при $h_{B1} > 1,5$ двухходовую обмотку.

По известным Π_1 и h_{B1} подбирают подходящее сечение провода с соблюдением следующих правил:

– минимальное число параллельных проводов 4;

– все параллельные провода имеют одинаковые размеры и площадь поперечного сечения.

Подобранные размеры провода для масляных трансформаторов записываются следующим образом:

$$\text{ПБ} \times \frac{a \times b}{a' \times b'} \quad \text{АПБ} \times n_b \times \frac{a \times b}{a' \times b'}$$

для сухих трансформаторов:

$$\text{ПСД} \times n_{B1} \times \frac{a \cdot b}{a' \cdot b'}$$

Полное сечение, мм. , витка:

$$\Pi_1 = n_{B1} \Pi_1$$

где Π_1 – сечение одного провода.

Полученная плотность тока, A :

$$\Delta_1 = \frac{I_{\Phi 1}}{\Pi_1}$$

Осевой размер витка h_{B1} и радиальный размер обмотки для одноходовой и двухходовой обмоток. Осевой размер обмотки:

– для одноходовой обмотки, см. , с тремя транспозициями:

$$I_1 = b' (W_1 + 4) + K \times h_K \times (W_1 + 3)$$

– для одноходовой обмотки, см. , с каналами через один виток и с тремя транспозициями:

$$I_1 = b' \times (W_1 + 1) + K \left[h_K \times \left(\frac{W_1}{2} + 2 \right) + b \times \frac{W_1}{2} \right]$$

где b – толщина прокладки между сведенными витками; обычно $b = 0,1 - 0,15$ см.;
– для двухходовой обмотки, см. с равномерно распределенной транспозицией:

$$I_1 = 2b'(W_1 + 1) + K \times h_k \times (2W_1 + 1)$$

– для двухходовой обмотки, см. без канала между двумя группами проводов:

$$I_1 = 2b'(W_1 + 1) + K \times [h_k \times w_1 + b \times (W_1 + 1)]$$

где K – коэффициент, учитывающий усадку межкатушечных прокладок после опрессовки обмотки, и может быть принят $K = 0,94 - 0,96$.

Радиальный размер винтовой обмотки α_1 определяется:

для одноходовой обмотки:

$$\alpha_1 = n_B \times \alpha'$$

где n_B – число параллельных проводов в витке; α' – радиальный размер провода с изоляцией.

для двухходовой обмотки:

$$\alpha_1 = \frac{n_b}{2} \times \alpha'$$

для трехходовой обмотки:

$$\alpha_1 = \frac{n_b}{3} \times \alpha'$$

для многоходовой обмотки:

$$\alpha_1 = \frac{n_b}{n_x} \times \alpha'$$

где n_x – число ходов обмотки.

На рис. 4. 9. показаны различные варианты выполнения винтовых обмоток и методика определения осевого размера витка.

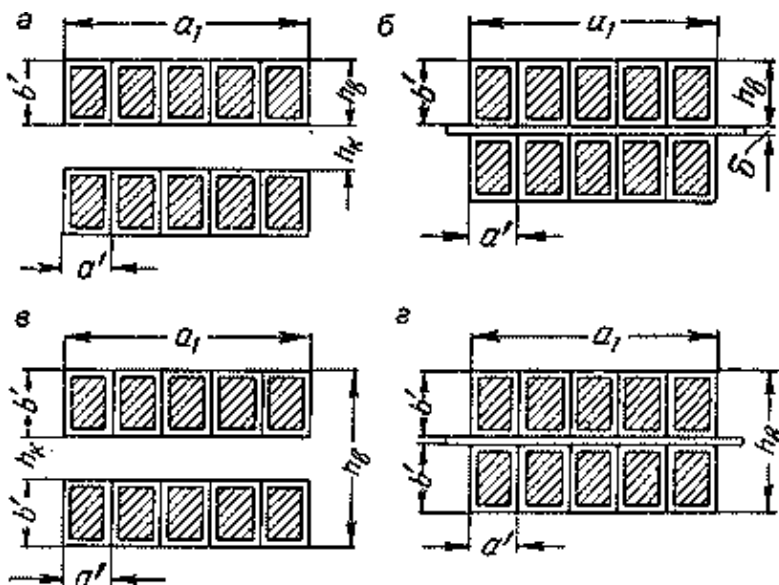


Рис. 4. 9. Определение осевого размера витка и радиального размера для винтовой обмотки: а – одноходовая обмотка с каналами между всеми витками; б – одноходовая обмотка с изоляционными шайбами между витками; в – двухходовая обмотка с охлаждающим каналом между ходами в одном витке; г – двухходовая обмотка без охлаждающего канала между ходами в одном витке.

Схемы транспозиции проводов в винтовых обмотках поясняют рис. 4. 10 и 4. 11.

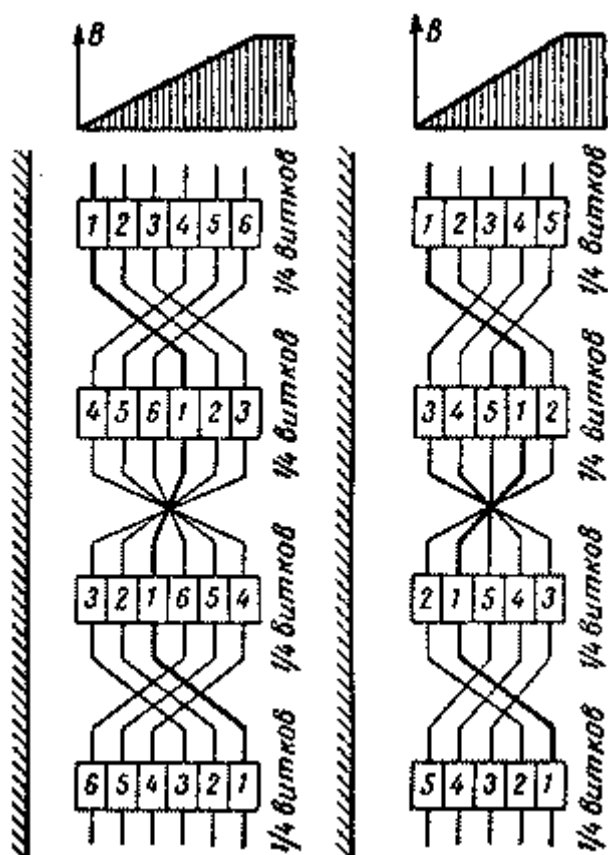


Рис. 4. 10. Схема транспозиции параллельных проводов в однофазовой обмотке:
 а – четное число проводов; б – нечетное число проводов.

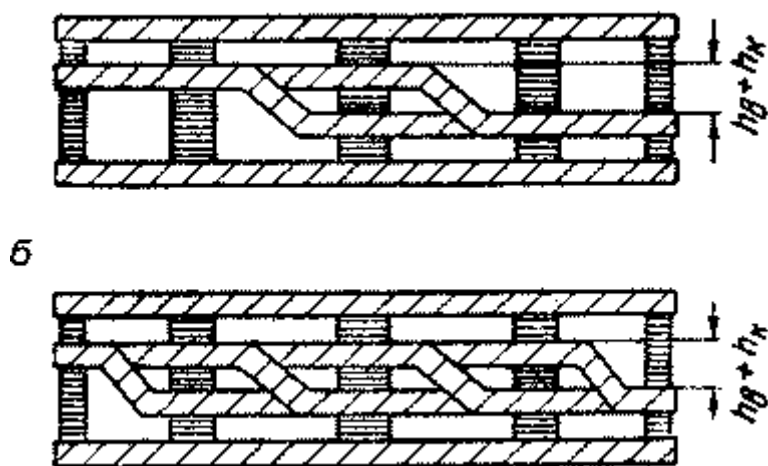


Рис. 4. 11. Увеличение высоты однофазовой обмотки при транспозициях для обмотки из четырех параллельных проводов: а – групповая транспозиция; б – общая транспозиция.

Внутренний диаметр обмотки

$$D'_1 = d + 2\alpha_{01}$$

Наружный диаметр обмотки

$$D''_1 = D'_1 + 2\alpha_1$$

Охлаждаемая поверхность, m^2 ,

– для одноходовой обмотки с каналами после каждого витка

$$P_{01} = 2 \times c \times K \times W_1 \times \Pi \times (D_1 + a_1) \times (a_1 + b') \times 10^{-4}$$

– для одноходовой обмотки с каналами через один виток

$$P_{01} = c \times K \times W_1 \times \Pi \times (D_1 + a_1) \times (a_1 + 2b') \times 10^{-4}$$

– для двухходовой обмотки с каналами между двумя группами проводов

$$P_{01} = 4 \times c \times K \times W_1 \times \Pi \times (D_1 + a_1) \times (a_1 + b') \times 10^{-4}$$

– для двухходовой обмотки без канала между двумя группами проводов

$$P_{01} = 2 \times c \times K \times W_1 \times \Pi \times (D_1 + a_1) \times (a_1 + 2b') \times 10^{-4},$$

где c – число активных стержней; K – коэффициент, учитывающий закрытие части поверхностей обмотки рейками и прокладками ($K = 0,75$).

4. 4. Расчет обмоток высокого напряжения.

4. 4. 1. Выбор способа регулирования напряжения обмоток ВН.

При выборе типа обмотки высокого напряжения (ВН) следует учитывать необходимость выполнения в обмотке ответвлений для регулирования напряжения. Согласно ГОСТ 16110–82 предусмотрено два вида переключения ответвлений обмотки трансформатора:

– без перерыва нагрузки РПН;

– переключение ответвлений обмотки трансформатора без возбуждения (ПБВ), т. е. после отключения всех обмоток трансформатора от сети.

В масляных трансформаторах мощностью от 25 до 200000 кВА с ПБВ предусмотрено выполнение 4 ответвлений в обмотках ВН соответственно на +5 %, +2,5 %, –2,5 %, –5 % относительно номинального напряжения. Переключение ответвлений должно производиться специальными переключателями.

Переключение ответвлений обмоток допускается только при отключении всех обмоток трансформатора от сети и должно производиться специальными переключателями, встроенными в трансформатор с выведенными из бака рукоятками управления. Наиболее употребляемые схемы регулирования приведены на рис. 4.12. Схема по рис. 4.12, а применяется для регулирования при многослойной цилиндрической обмотке. По схеме рис. 4.12, б, в может выполняться регулирование напряжения при многослойной цилиндрической катушечной и непрерывной катушечной обмотке при номинальном напряжении до 38,5 кВ. Схемы рис. 4.12, в и 4.12, г применяются для тех же обмоток, что и схема рис. 4.12, б, но при номинальном напряжении от 3 до 220 кВ.

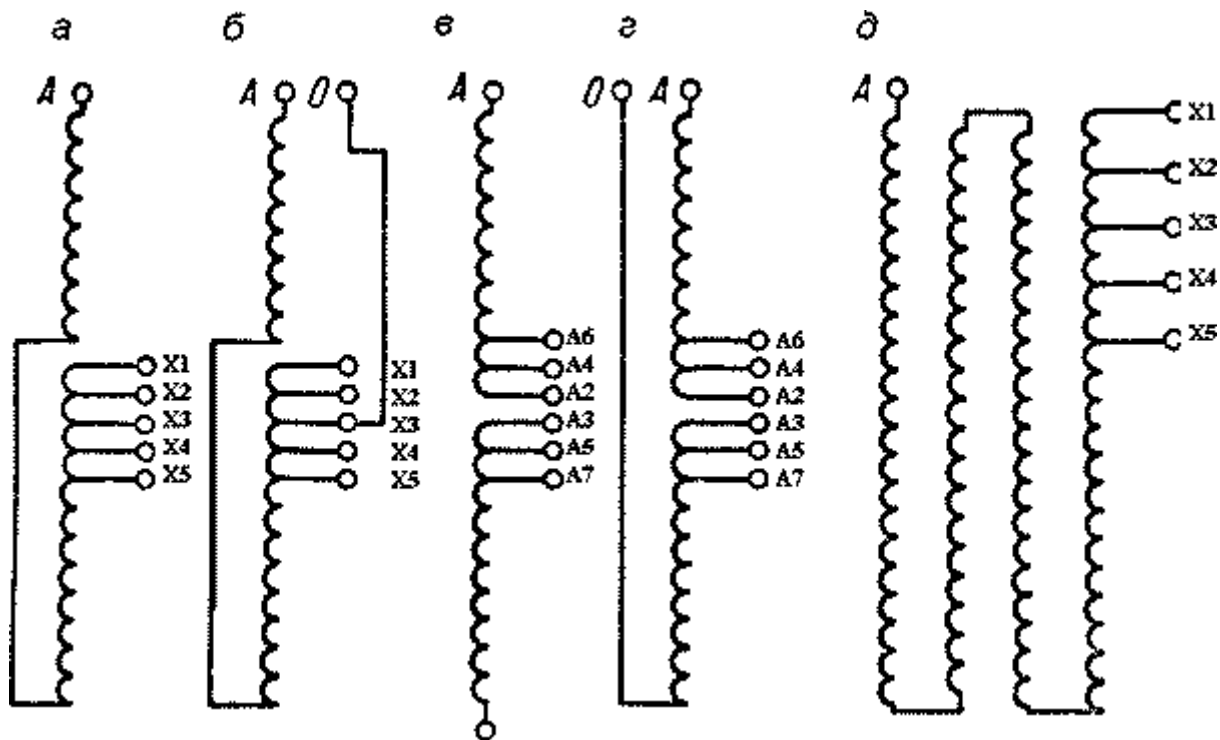


Рис. 4. 12. Принципиальные схемы регулирования напряжения обмоток ВН.

В сухих трансформаторах применяется регулирование напряжения обмотки ВН на $\pm 2 \times 2,5\%$ по схеме 4.12, б. Регулирование ответвлений выводится на доску зажимов, и переключение с одной ступени на другую осуществляется при отключении всех обмоток от сети. В трансформаторах с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН) устанавливаются следующие пределы регулирования:

1000–6300 кВА, 20 и 35 кВ $\pm 6 \times 1,5\% = \pm 9\%$

2500 кВА, 110 кВ, РПН на НН $+10 \times 1,5\% = 15\%$, $-8 \times 1,5\% = -12\%$

6300 – 125000 кВА, 110 кВ $\pm 9 \times 1,67\% = \pm 16\%$

Аппаратура РПН в обмотках класса напряжения 110 кВ имеет класс напряжения 35 кВ и встраивается в нейтраль этих обмоток. Нейтраль должна быть заземлена наглухо. Применяются различные схемы регулирования РПН с применением различных способов ограничения токов при переключении витков, которые подробно описаны в [5].

4. 4. 2. Расчет основных параметров обмоток ВН.

Число витков при номинальном напряжении определяется по формуле:

$$W_{H2} = \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 1}} W_1 \text{ или } W_{H2} = \frac{U_{\phi 2}}{U_B}$$

Обычно ступени регулирования напряжения делаются равными между собой, что обуславливает также и равенство числа витков на стержнях. В этом случае число витков на ответвлениях:

– при четырех ступенях регулирования напряжения.

1–я верхняя ступень

$$W_2 = W_{H2} + 2W_p$$

2-я верхняя ступень

$$W_2 = W_{H2} + W_p \quad W_p = \frac{\Delta U}{U_B}$$

при номинальном напряжении:

$$W_2 = W_{H2}$$

2-я нижняя ступень

$$W_2 = W_{H2} - W_p \quad \Delta U = \frac{U_{\phi 2} \times 2,5\%}{100\%}$$

1-я нижняя ступень

$$W_2 = W_{H2} - 2W_p$$

Плотность тока $\Delta_2, A/mm^2$, в обмотке ВН предварительно определяется по формуле:

$$\Delta_2 \approx \Delta_{2cp} - \Delta_1$$

Сечение витка, mm^2 , предварительно определяется по формуле:

$$\Pi_2 = \frac{I_{\phi 2}}{\Delta_2}$$

Предварительное определение числа катушек для многослойной цилиндрической катушечной и непрерывной катушечной обмоток производится с таким расчетом:

– чтобы число катушек было четным;

– рабочее напряжение одной катушки при классе напряжения до 35 кВ не превосходило 800÷1000 В; при классе 110 кВ – 1500÷1600 В; при классе 220 кВ – 2500÷3000 В;

– при номинальном напряжении обмотки ВН 35 кВ и выше все витки, служащие для регулирования напряжения, и витки с усиленной изоляцией были размещены в отдельных катушках.

4. 4. 3. Расчет многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода.

После определения ориентировочного значения сечения витка Π_2 из табл. 4.6. подбирается провод подходящего сечения или два параллельных провода с диаметром провода без изоляции d_2 и провода в изоляции d_2^1 .

Подобранные размеры записываются так:

$$\text{марка провода} \times n_{B2} \times \frac{d_2}{d_2^1}$$

где n_{B2} – число параллельных проводов.

Полное сечение, mm^2 , витка определяется по выражению:

$$\Pi'_2 = n_B \times \Pi_2^1$$

где Π'_2 – сечение одного провода; n_B – число проводов в витке.

Полученная плотность тока, A/mm^2 ,

$$\Delta_2 = \frac{I_{\phi 2}}{\Pi_2}$$

Число витков в слое:

$$W_{cl2} = \frac{l_2}{n_{B2} \times d_2^1} - 1$$

Число слоев в обмотке:

$$n_{\text{сл}2} = \frac{W_2}{W_{\text{сл}2}}$$

$n_{\text{сл}2}$ – округляется до большего целого числа.

Рабочее напряжение двух слоев, В:

$$U_{\text{мсл}} = 2W_{\text{сл}2}U_{\text{в}}$$

В большинстве случаев по условиям охлаждения обмотка каждого стержня выполняется в виде двух концентрических катушек с осевым масляным каналом между ними. Число слоев внутренней катушки при этом должно составлять не более $1/3 \div 2/5$ от общего числа слоев обмотки. В случае применения этого типа обмотки на стороне НН числа слоев внутренней и наружной катушек делаются равными.

Минимальная ширина масляного канала между катушками выбирается по справочным данным. В трансформаторах мощностью на один стержень не более 3–4 кВА возможно применение обмотки, состоящей из одной катушки без осевого канала. Возможны варианты, когда обмотка делится на 3–4 и более катушек. Напряжение двух слоев определяется для того, чтобы выбрать толщину межслойной изоляции $\delta_{\text{мсл}}$.

Радиальный размер, обмотки, см.,

– одна катушка без экрана

$$\alpha_2 = d_2^1 n_{\text{ск}2} + \delta_{\text{м.сл.}} (n_{\text{сл}2} - 1)$$

– две катушки без экрана

$$\alpha_2 = d_2^1 n_{\text{ск}2} + \delta_{\text{м.сл.}} (n_{\text{сл}2} - 1) + \alpha_{22}^1$$

где d_2^1 – диаметр провода с изоляцией; $\delta_{\text{мсл}}$ – межслойная изоляция в зависимости от напряжения двух слоев $U_{\text{мсл}}$; α_{22}^1 – масляный охлаждающий канал.

Для защиты обмоток трансформатора от импульсных перенапряжений в обмотках класса напряжения 35 кВ под внутренним слоем их устанавливается металлический экран – незамкнутый цилиндр из латунного листа толщиной 0,5 мм. Экран соединяется электрически с линейным концом обмотки (начало внутреннего слоя) и изолируется от внутреннего слоя обмотки обычной межслойной изоляцией или листом картона толщиной 0,1 см. Такая же изоляция экрана устанавливается со стороны масляного канала. При наличии экрана радиальный размер обмотки определяется по формуле:

$$\alpha_2^1 = \alpha_2 + \delta_{\text{эк}} + \delta_{\text{м.сл.}}$$

где $\delta_{\text{эк}} = 0,05$ см.

Внутренний диаметр обмотки, см.:

$$D_2'' = D_1'' + 2\alpha_{12}$$

где D_2'' – наружный диаметр обмотки НН.

Наружный диаметр обмотки, см.,

– без экрана

$$D_2'' = D_2' + 2\alpha_2$$

– с экраном

$$D_2'' = D_2' + 2\alpha_2^1$$

Для обмотки, состоящей из одной катушки, намотанной непосредственно на изоляционный цилиндр без осевого канала, – одна поверхность охлаждения, м²:

$$P_{02} = cK\pi(D_2' + D_2'')l_2 10^{-4} (K = 1,0)$$

Для одной катушки, намотанной на цилиндре на рейках – две поверхности охлаждения:

$$P_{02} = cK\pi(D'_2 + D''_2)l_2 10^{-4} (K = 0,88)$$

Для обмотки, состоящей из двух катушек с осевым каналом между ними, внутренняя катушка намотана непосредственно на цилиндр, – три поверхности охлаждения:

$$P_{02} = 1,5cK\pi(D'_2 + D''_2)l_2 10^{-4} (K = 0,83)$$

Для того же случая, когда внутренняя катушка на цилиндре на рейках:

$$P_{02} = 2cK\pi(D'_2 + D''_2)l_2 10^{-4} (K = 0,8)$$

4. 4. 4. Расчет непрерывной катушечной обмотки.

Определяется ориентировочное сечение витка Π_2 . По этому сечению по сортаменту обмоточного провода подбираются подходящие сечения прямоугольного провода. Число проводов – один или два–четыре одинакового сечения.

Выбранные размеры провода записываются так:

$$\text{марка провода} \times n_{в2} \times \frac{a \times b}{a' \times b'}$$

Принятое сечение одного провода – $\Pi'_2, \text{мм}^2$

Полное сечение витка:

$$\Pi_2 = n_{в2}\Pi'_2, \text{мм}^2$$

Действительная плотность тока в обмотке, $A/\text{мм}^2$

$$\Delta_2 = \frac{I_2}{\Pi_2}$$

Высота катушки $h_{\text{кат}}$ в этой обмотке равна большему размеру провода в изоляции b' .

Число катушек на одном стержне определяется по формулам:

– для случая, когда каналы сделаны между всеми катушками

$$n_{\text{кат}2} = \frac{l_2 + h_{\text{к}}}{b' + h_{\text{к}}}$$

здесь $h_{\text{к}}$ – канал между катушками, b' принимается в см.

– для сдвоенных катушек с шайбами в двойных и с каналами между двойными катушками:

$$n_{\text{кат}2} = \frac{2(l_2 + h_{\text{к}})}{2b' + h_{\text{к}} + b_{\text{ш}}}$$

Число витков в катушке ориентировочно:

$$W_{\text{кат}2} \cong \frac{W_2}{n_{\text{кат}2}}$$

где W_2 – число витков с учетом регулировочных: $W_2 = W_{2\text{н}} + W_{2\text{р}}$

Осевой размер (высота) канала h_K в трансформаторах мощностью S от 160 до 6300 кВА и рабочим напряжением не более 35 кВ колеблется от 0,4 до 0,8 см.; в сухих трансформаторах – от 1,0 до 2,0 см. В двойных катушках, если в них не делается канал, прокладываются шайбы толщиной 0,05 см. В трансформаторах бóльшей мощности и при напряжениях 110 и 220 кВ высота канала может быть выбрана до 1,2–1,5 см.

При проектировании обмотки должны соблюдаться следующие требования:

- общая высота (осевой размер) обмотки l_2 должна совпадать с высотой обмотки НН l_1 ;
- регулировочные витки и витки с усиленной изоляцией должны быть уложены в отдельные катушки;
- общее количество катушек должно быть четным, число различных видов катушек не более четырех. Высота обмотки с каналами между всеми катушками, см.:

$$l_2 = v'n_{\text{кат}2} + K[h_K \times (n_{\text{кат}2} - 2) + l_{\text{кр}}]$$

а для обмотки с шайбами в двойных и с каналами между двойными катушками:

$$l_2 = v'n_{\text{кат}2} + K\left[h_K \times \left(\frac{n_{\text{кат}2}}{2} - 2\right) + h_{\text{кр}} + \frac{n_{\text{кат}2}}{2} b_{\text{ш}}\right]$$

Высота канала в месте разрыва обмотки и размещения регулировочных витков $h_{\text{кр}}$ выбирается по справочным данным. Коэффициент K , учитывающий усадку изоляции после сушки и опрессовки обмотки, принимается равным 0,96.

Радиальный размер обмотки, см.:

$$\alpha_2 = \alpha' W_{\text{кат}2} n_{\text{в}}$$

где $W_{\text{кат}2}$ – число витков катушки, дополненное до большего целого числа; α' – толщина провода в изоляции; $n_{\text{в}}$ – число параллельных проводов в витке.

Внутренний диаметр обмотки, см.: $D'_2 = D'_1 + 2\alpha_{12}$

внешний диаметр обмотки: $D''_2 = D'_2 + 2\alpha_2$

Поверхность, м^2 , охлаждения обмотки: при наличии радиальных каналов между всеми катушками:

$$П_{02} = 2сК\pi n_{\text{кат}2} (D'_2 + \alpha_2) \times (\alpha_2 + v') \times 10^{-4} \quad (K = 0,75)$$

при наличии радиальных каналов только между двойными катушками:

$$П_{02} = 2сК\pi n_{\text{кат}2} (D'_2 + \alpha_2) \times (\alpha_2 + 2v') \times 10^{-4}$$

Контрольные вопросы.

1. Какие материалы применяются в качестве обмоточного провода для силовых трансформаторов?
2. Назовите марки проводов для изготовления обмоток силовых масляных и сухих трансформаторов.
3. Поясните геометрические размеры обмоточных проводов круглого и прямоугольного сечения с учетом изоляции.
4. Из каких материалов выполняется межслойная изоляция обмоток, изоляционные цилиндры, прессующие кольца и прокладки, другие изолирующие конструкции? Какие виды обмоток применяются для трансформаторов?
5. Когда выполняются винтовые и непрерывные обмотки и чем они отличаются друг от друга?
6. Что такое транспозиция проводов в винтовых и непрерывных катушечных обмотках и ее значение?

Устройство многослойных цилиндрических обмоток из круглого провода.

1. Поясните методику расчета цилиндрических обмоток различных типов.
2. На какие значения напряжения и тока (линейные или фазные) производится расчет трансформатора?
3. Какие соотношения между линейными и фазными напряжениями и соответственно между линейными и фазными токами при соединении обмоток по схемам "звезда" и "треугольник"?
4. Какие основные изоляционные промежутки используются в конструкции обмоток трансформатора и как они определяются?
5. Назовите основные критерии, по которым выбираются типы обмоток трансформатора.
6. Поясните методику расчета цилиндрических многослойных обмоток.
7. В чем состоит методика расчета винтовых и непрерывных катушечных обмоток?
8. Как подбирается марка провода и число параллельных проводов для обмоток трансформатора?
9. Почему обмотки ВН и НН не должны значительно отличаться по высоте?
10. Какие типы обмоток трансформатора являются наиболее прочными механически?
11. По какому критерию выбирается толщина и вид межслойной изоляции в цилиндрических многослойных обмотках?
12. Почему в сухих трансформаторах применяется изоляция проводов типа ПСД и ПСДК? Дайте характеристику этим маркам.
13. Как конструктивно выполняются радиальные охлаждающие каналы в винтовых и непрерывных катушечных обмотках?

Рекомендуемая литература: [11, 12, 14, 15, 19].

Заключение

Обмотка является наиболее важной и ответственной частью электрических машин постоянного и переменного тока, а также силовых трансформаторов, которая в основном определяется их надежностью, сроком службы и стоимостью.

Данное учебное пособие "Обмотки электрических машин и трансформаторов" поможет студентам в изучении разделов курсов "Электромеханика" или "Электрические машины и привод". В нем приводятся материалы по конструкции обмоток различных типов, методики их расчета, правила выполнения развернутых схем с соответствующими примерами конкретных обмоток якоря машин постоянного тока, обмоток статора машин переменного тока и трансформаторов.

Пособие позволяет повысить качество курсового и дипломного проектирования по расчету и конструированию двигателей и генераторов постоянного тока, синхронных генераторов и асинхронных двигателей электрических машин и силовых масляных и сухих трансформаторов, а также скоростных электрических машин.

Библиографический список

1. Вольдек, А. И. Электрические машины, 1974.
2. Копылов, И. П. Электрические машины, 1986.
3. Копылов, И. П. Электрические машины, 2000.
4. Винокуров, В. А. Электрические машины железнодорожного транспорта, 1986.
- 5.. Брускин Д. Э, Зарохович А. Е., Хвостов В. С., Электрические машины и микромашины. 1971.
6. Кулик Ю. А. Электрические машины, 1971.
7. Винников И. М. Технология и расчеты при перемотке двигателя переменного тока, 1970.
8. Маршак, Е. Л. Ремонт и модернизация асинхронных двигателей, 1970.
9. Сечин В. И. Безредукторные электроприводы с линейными и дуговыми двигателями, монография, 2003.
10. Геращенко Г. В. Справочник по обмоточным данным электрических машин и аппаратов, 1972.
11. Тихомиров П. М., Расчет трансформаторов, 1986.
12. Гончарук А. И. Расчет и конструирование трансформаторов, 1990.
13. Токарев Б. Ф. Электрические машины, 1989.
14. Сечин В. И. Расчет силовых трансформаторов, 1993.
15. Сечин В. И. Проектирование силовых трансформаторов, 2005.
16. ГОСТ 2. 319. – 68. ЕСКД. Правила выполнения диаграмм; введ. 01.01.83. М. 1988.
17. Важнов А. И. Электрические машины, 1969.
18. Сечин В. И. Параллельная работа тяговых электродвигателей на локомотивах с электрической передачей, монография, 2007.
19. Атабеков В. Б. Ремонт трансформаторов, электрических машин и аппаратов, 1988.
20. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. Электрические машины, 1987.
21. Кацман М. М. Электрические машины и трансформаторы, 1976.

Оглавление

Введение 3

1. Якорные обмотки электрических машин постоянного тока 3

1. 1. Общие сведения об якорных обмотках. Устройство обмоток 3

1. 2. Условия симметрии обмоток 10

1. 3. Шаги обмоток якоря 12

1. 4. Простые петлевые обмотки 14

1. 4. 1. Пример простой четырехполюсной петлевой обмотки якоря с числом элементарных пазов в реальном, равным единице 15

1. 4. 2. Пример простой четырехполюсной петлевой обмотки якоря с числом элементарных пазов в реальном, равным двум 18

1. 4. 3. Пример простой петлевой обмотки с числом элементарных пазов в реальном равным трем 22

1. 5. Сложные петлевые обмотки 25

1. 5. 1. Общие сведения о сложных петлевых обмотках 25

1. 5. 2. Пример сложной петлевой обмотки с числом элементарных пазов в реальном равным трем 26

1. 6. Простые волновые обмотки 29

1. 6. 1. Пример простой волновой четырехполюсной обмотки якоря с числом элементарных пазов в реальном равным единице 30

1. 6. 2. Пример простой волновой четырехполюсной обмотки якоря с числом элементарных пазов в реальной равным трем 34

- 1. 7. Сложные волновые обмотки 37
- 1. 7. 1. Пример сложной волновой четырехполюсной обмотки якоря с числом элементарных пазов в реальной равным двум 37
- 1. 7. 2. Пример сложной волновой четырехполюсной обмотки якоря с числом элементарных пазов в реальной равным трем 41
- 1. 7. 3. Пример сложной волновой восьмиполюсной обмотки якоря с числом элементарных пазов в реальной равным трем 45
- 1. 8. Комбинированная обмотка якоря 49

2. Обмотки электрических машин переменного тока 50

- 2. 1. Общие сведения об обмотках переменного тока 50
- 2. 2. Простейшая трехфазная двухполюсная двухслойная сосредоточенная петлевая обмотка 52
- 2. 3. Простейшая трехфазная двухполюсная однослойная сосредоточенная обмотка 55
- 2. 4. Трехфазные петлевые двухслойные обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу 56
 - 2. 4. 1. Пример трехфазной четырехполюсной двухслойной петлевой обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с полным шагом 56
 - 2. 4. 2. Пример трехфазной четырехполюсной двухслойной петлевой обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с укороченным шагом 59
 - 2. 4. 3. Пример трехфазной двухполюсной петлевой обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с укороченным шагом 61
 - 2. 4. 4. Пример трехфазной шестиполюсной двухслойной петлевой обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с укороченным шагом 63
 - 2. 4. 5. Пример трехфазной шестиполюсной двухслойной волновой обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с укороченным шагом 64
 - 2. 4. 6. Пример трехфазной восьмиполюсной двухслойной петлевой обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с полным шагом 65
 - 2. 4. 7. Пример трехфазной восьмиполюсной двухслойной петлевой обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с укороченным шагом 66

2. 5. Двухслойные обмотки машин переменного тока с дробным числом пазов на полюс и фазу. 67

- 2. 5. 1. Общие сведения об обмотках с дробным значением числа пазов на полюс и фазу 67
- 2. 5. 2. Пример трехфазной шестиполюсной петлевой обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу 68
- 2. 5. 3. Пример трехфазной двухслойной четырехполюсной петлевой обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу 70
- 2. 5. 4. Пример трехфазной четырехполюсной двухслойной петлевой обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу 72
- 2. 5. 5. Пример трехфазной восьмиполюсной двухслойной петлевой обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу 74
- 2. 5. 6. Пример несимметричной трехфазной двенадцатиполюсной двухслойной обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу 76
- 2. 5. 7. Пример трехфазной четырехполюсной двухслойной волновой обмотки ротора с дробным числом пазов на полюс и фазу 79

2. 6. Трехфазные однослойные. 80

- 2. 6. 1. Пример трехфазной концентрической однослойной двухплоскостной обмотки 80
- 2. 6. 2. Пример трехфазной четырехполюсной трехплоскостной однослойной концентрической обмотки 82
- 2. 6. 3. Пример трехфазной двухполюсной трехплоскостной однослойной концентрической обмотки 84
- 2. 6. 4. Пример трехфазной четырехплоскостной простой шаблонной однослойной обмотки 85
- 2. 6. 5. Пример трехфазной двухполюсной однослойной шаблонной обмотки "в развалку" 86
- 2. 6. 6. Пример трехфазной однослойной двухполюсной цепной обмотки 87
- 2. 6. 7. Пример двухфазной петлевой двухполюсной четырехполюсной обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу с укороченным шагом 89

3. Обмотки статора многоскоростных асинхронных короткозамкнутых двигателей. 91

- 3. 1. Общие сведения о регулировании частоты вращения асинхронных двигателей изменением числа пар полюсов 91
- 3. 2. Схемы обмоток статора двухскоростных асинхронных двигателей 91
- 3. 3. Схемы обмоток статора трехскоростных асинхронных двигателей 95
- 3. 4. Схемы обмоток статора четырехскоростных асинхронных двигателей 98

4. Обмотки трансформаторов. 100

- 4. 1. Типы обмоток трансформаторов 100
- 4. 2. Выбор типа обмотки 104
- 4. 3. Методика расчета обмоток различных типов 106
 - 4. 3. 1. Расчет цилиндрических обмоток из прямоугольного провода 107
 - 4. 3. 2. Расчет многослойной цилиндрической обмотки из прямоугольного провода 109
 - 4. 3. 3. Расчет одноходовых, двухходовых и многоходовых винтовых обмоток 111
- 4. 4. Расчет обмоток ВН 114
 - 4. 4.1. Выбор способа регулирования напряжения обмоток ВН 114
 - 4. 4. 2. Расчет основных параметров обмоток ВН 115
 - 4. 4. 3. Расчет многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода 116
 - 4. 4. 4. Расчет непрерывной катушечной обмотки 118
- Заключение 120
- Библиографический список 121

Учебное издание

Сечин Владимир Ильич
Моисеева Ольга Викторовна

ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ

Учебное пособие

Редактор *А.А. Иванова*
Технический редактор *А.А. Курилко*

План 2008 г. Поз. 6.2.
Сдано в набор 5.12.2007. Подписано в печать 10.04.2008. Усл. печ. л. 9,7. Зак. 407.
Тираж 100 экз. Цена 174 руб.

Издательство ДВГУПС
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.